

DOI: 10.5846/stxb201812062681

丁瑞睿, 郭匿春, 马友华. 巢湖双桥河底泥疏浚过程中浮游植物功能群分类研究. 生态学报, 2020, 40(7): 2427-2438.

Ding R R, Guo N C, Ma Y H. A study of the phytoplankton functional classification of the Shuangqiao River in the Chaohu basin during a sediment dredging period. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2427-2438.

巢湖双桥河底泥疏浚过程中浮游植物功能群分类研究

丁瑞睿¹, 郭匿春^{1,*}, 马友华²

¹ 安徽农业大学, 资源与环境学院, 合肥 230036

² 安徽农业大学, 新农村研究院, 合肥 230036

摘要:浮游植物功能群分类分析可以精确地反映水体环境变化对水生生物群落的影响。为探究巢湖双桥河底泥疏浚工程对浮游植物群落及水生生态系统的影响,对 2017 年 6 月—2018 年 3 月双桥河底泥疏浚期间的水体理化因子、浮游植物群落结构和功能群划分开展了研究。研究发现,底泥疏浚工程能够大量削减双桥河水体中的氮、磷营养盐,但疏浚后的双桥河仍处于中-富营养状态;双桥河浮游植物群落依据其生态功能可划分为 M、H1、H2、MP、S1、L₀、X2、X1、J、F、N、G、X3、C、D、Y、W1、L_M、E、T、S_N、K、P 等 23 个功能群,绝对优势功能群为以微囊藻为主的 M 功能群和以硅藻为主的 MP、P 功能群。底泥疏浚工程对双桥河浮游植物种类的影响不大,但藻类密度和生物量在疏浚后有显著地下降,浮游植物多样性指数也有提升。将浮游植物功能群生物量与环境因子进行冗余分析(RDA)和 Pearson 分析发现,水环境因子变化对双桥河浮游植物功能群产生了较大影响,双桥河浮游藻类优势功能群由底泥疏浚前的 M、MP、P、W1、Y 类转变为底泥疏浚后的 C、F、J、M、MP、P、Y 类。其中,底泥疏浚工程造成的氮营养盐削减可以对双桥河浮游植物功能群产生较大影响。研究认为双桥河底泥疏浚工程在改善河流浮游植物生态功能,减轻水体污染程度上有积极的作用。

关键词:浮游植物功能群; 巢湖; 双桥河; 底泥疏浚; 环境因子; 冗余分析

A study of the phytoplankton functional classification of the Shuangqiao River in the Chaohu basin during a sediment dredging period

DING Ruirui¹, GUO Nichun^{1,*}, MA Youhua²

¹ School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

² New Rural Development Research Institute, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

Abstract: The taxonomic analysis of phytoplankton functional groups can accurately reflect the impacts of changes in water quality on the hydrobiological community. In order to explore the effects of sediment dredging on the phytoplankton community and aquatic ecosystem of the Shuangqiao River in the Chaohu basin, the environmental factors of the river and the structure and functional groups of the phytoplankton community during sediment dredging period of the Shuangqiao River from June 2017 to March 2018 were investigated. The results showed that sediment dredging greatly reduced the concentration of nitrogen and phosphorus in the Shuangqiao River, but the river still retained its middle—eutrophic state after sediment dredging. In total, 23 phytoplankton functional groups were identified: M, H1, H2, MP, S1, L₀, X2, X1, J, F, N, G, X3, C, D, Y, W1, L_M, E, T, S_N, K, and P. The phytoplankton functional groups were dominated by the M functional group (mainly comprised of *Microcystis* spp.) and the MP and P functional groups (mainly composed of Diatoms). Sediment dredging had little effect on the species composition of the phytoplankton in the Shuangqiao River. However, the density and biomass of algae declined significantly after sediment dredging. The phytoplankton diversity index has also improved. Redundancy analysis (RDA) and Pearson analysis were used to explore the relationships between

基金项目:国家自然科学基金项目(31300395);中科院南京地湖所湖泊与环境国家重点实验室开放基金(2014SKL008)

收稿日期:2018-12-06; **网络出版日期:**2019-12-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guonichun@ahau.edu.cn

phytoplankton functional groups and the major environmental factors of the Shuangqiao River. A significant relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors was found. Among them, the dominant functional groups of phytoplankton in the Shuangqiao River changed from M, MP, P, W1, and Y before sediment dredging to C, F, J, M, MP, P, and Y after sediment dredging. At the same time, the reduction of nitrogen concentrations caused by sediment dredging projects has had a great impact on the phytoplankton functional groups of the Shuangqiao River. This study shows that the sediment dredging project of the Shuangqiao River has had a positive effect by improving the ecological functions of the phytoplankton community and reducing the degree of water pollution.

Key Words: phytoplankton functional groups; Chaohu basin; Shuangqiao River; sediment dredging; environmental factors; RDA analysis

浮游植物是河流生态系统中主要的初级生产者^[1],由于其个体小、细胞结构简单且对水环境变化十分敏感,浮游植物的种类、丰度、生物量等常被作为评价水质的重要指标^[2-5]。浮游植物丰度和优势种群也可以有效地反映人类活动对水体生态环境的影响,而水环境因子的变化也会影响浮游植物的群落结构^[6]。为了更准确研究水环境变化后的浮游植物群落结构,学者们提出了浮游植物功能群的概念,即将一个生态系统内结构和行为上相似的浮游植物归为一个功能群。目前,功能群划分系统有 FG (Functional Groups)、MFG (Morphology-Functional Groups)、MBFG (Morphology-Based Functional Groups) 和 PFT (Plant Functional Types) 等^[7]。其中,FG 法是 Reynolds 等^[8]最早提出的、也是使用时间最长的浮游植物功能群分类方法。该方法的建立基于两个重要的生态学假设:适应能力强的物种比适应能力弱的物种更能耐受环境中的限制因素;包含多种环境因子的复杂环境总会被一系列适应性相似的物种占据^[7-8]。浮游植物功能群分类法因其能精确地反映浮游植物群落与不同水体环境压力之间的相关性,在研究水体环境与浮游植物群落之间关系中逐渐得到越来越多的重视和应用^[9]。

双桥河位于巢湖北岸,是入巢湖污染最严重的 4 条入湖河流之一。河道全长约 7 km,流域面积约 27 km²,由上游凤凰之家河段、中游西撇洪沟和下游双桥河段组成^[10]。随着巢湖地区社会经济的发展,工农业对双桥河的污染持续增加。除外源污染外,河流内源营养盐释放也是造成双桥河富营养化的重要原因。双桥河水质长期处于劣 V 类,水体中氮、磷营养盐过剩,藻类大量繁殖,出现蓝藻水华现象。而藻类的生长代谢过程中,会释放出大量藻毒素,严重威胁河流的生态安全^[10-11]。为改善河流水环境,前期研究中大量使用了底泥疏浚、人工湿地、水体曝气等工程来解决河流富营养化造成的危害^[12-13]。其中底泥疏浚工程的基本原理是通过机械等方法疏挖表层富含营养盐的底泥,从而削减水体中氮、磷含量,进而实现蓝藻水华控制^[13]。在前期多次河道底泥疏浚的基础上,2017 年夏季,巢湖市政府对双桥河入湖口至西炮营社区长约 4806 m 的河道进行底泥疏浚工程。前期的研究主要集中于底泥疏浚前后双桥河的内源负荷和水质改善上,从浮游植物功能群变化评价底泥疏浚工程效果的研究较少^[11]。

本文通过研究双桥河底泥疏浚前后浮游植物群落结构,采用 FG 法对双桥河的浮游植物功能群进行分类,并研究底泥疏浚前后双桥河浮游植物功能群的组成及变化,通过冗余分析 (RDA) 和 Pearson 相关性分析确定影响双桥河浮游植物功能群变化的环境因子,从而探究底泥疏浚工程对双桥河浮游植物群落的影响。研究对评价底泥疏浚工程造成的双桥河水质改善及水生生态系统的健康与安全维护有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

对 2017 年 6 月—2018 年 3 月底泥疏浚期间巢湖双桥河的浮游植物群落结构及环境因子进行了调查。根据自然环境特点和河流流向,设置 12 个采样点,1—4 号点为双桥河未进行底泥疏浚的河段,5—12 号点为底泥疏浚工程的起点西炮营社区至终点双桥河入湖口(图 1)。分别于双桥河 2017 年夏季底泥疏浚前(2017 年

6月)、疏浚中(2017年9月)、疏浚后(2017年12月、2018年3月)进行4次采样。

1.2 样本采集

采用 YSI 6600V2 型多参数水质监测仪现场测定水温 (T, Temperature)、pH、溶解氧 (DO, Dissolved Oxygen)、浊度 (Turbidity) 等。水体理化指标包括总氮 (TN, Total Nitrogen)、总磷 (TP, Total Phosphorus)、氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, Ammonium Nitrogen)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$, Nitrate Nitrogen)、可溶性氮 (TDN, Total Dissolved Nitrogen)、可溶性磷 (TDP, Total Dissolved Phosphorus) 等参照《水和废水监测分析方法》在实验室内测定^[14]。

1.3 浮游植物密度与生物量及浮游植物功能群生物量计算

浮游植物样品取 500 mL 混合水样,加入约水样体积的 1% 的鲁哥试剂固定,静止沉淀 48 h 以上后弃去上清液,浓缩定容到 50 mL,加入福尔马林溶液保存。计数方法为目镜视野法,在 10×40 倍显微镜视野下用浮游植物计数框进行。每次计数 100 个以上视野,每个样本计数两次,当两次误差在 15% 以上时,重复计数样品。浮游植物鉴定参照《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[15],生物量估算参照金相灿等人的体积换算法^[16]。参照 Reynold 的 FG 功能群分类法,对双桥河浮游植物进行功能群分类^[7-8]。浮游植物功能群生物量指的是功能群代表性藻种(属)的生物量之和,通过各代表性藻种(属)的生物量相加得出^[17]。

1.4 浮游植物生物多样性及数据分析

根据 Mcnaughton 优势度指数 (Y) 确定浮游植物优势种,浮游植物的多样性分析选用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、均匀度指数 (J) 和丰富度指数 (d),避免单一指数造成的偏差。

$$\text{优势度指数}(Y): Y = \frac{n_i \cdot f_i}{N}$$

$$\text{香农—威纳指数}(H'): H' = - \sum_{i=1}^r (P_i \ln P_i)$$

$$\text{均匀度指数}(J): J = H' / \log_2 S$$

$$\text{丰富度指数}(d): d = (S - 1) / \ln N$$

式中, n_i 为物种 i 的密度, f_i 为物种 i 出现的频率, N 为所有物种的总密度。 r 为种类数, P_i 代表第 i 种密度占总密度的比例, S 为总种数。

研究数据经 Microsoft Excel 2010、Canoco 5.0、SPSS 20.0 等软件整理分析。双桥河浮游植物功能群与环境因子关系采用多元分析和 Pearson 相关性分析同时进行。其中多元分析先用 Canoco 5.0 对物种数据进行去趋势对应分析 (DCA), 排序轴小于 3, 因此选取冗余分析 (RDA) 探讨双桥河浮游植物功能群生物量与环境因子的关系, 环境因子数据全部进行 $\lg(x+1)$ 转换, 分析结果采用功能群-环境因子双序图表示。

2 结果与分析

2.1 双桥河底泥疏浚工程前后的水质变化

本研究中,未疏浚河段中氮、磷营养盐含量随季节更替并无显著变化。而双桥河疏浚河段的 pH、溶解氧

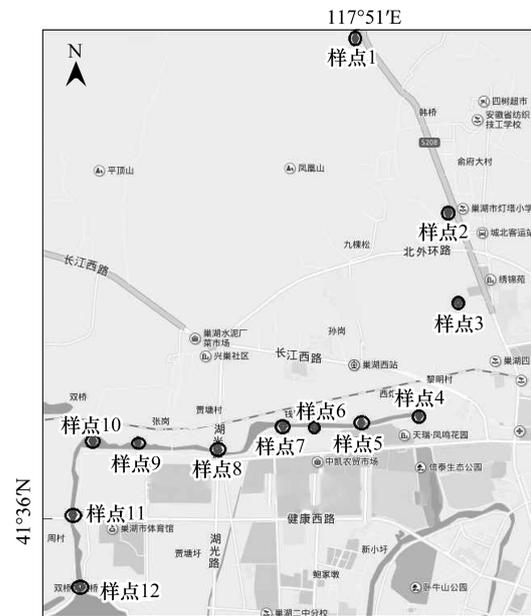


图1 双桥河采样点设置图

Fig.1 Location of sampling sites in Shuangqiao River

样点1: 7401 军工厂; 样点2: 灯塔小学; 样点3: 吴涧街道; 样点4: 篆池新村水闸; 样点5: 钱岗桥; 样点6: 潘岗桥; 样点7: 天瑞风鸣花园二期; 样点8: 湖光路桥; 样点9: 水泥厂湿地; 样点10: 水泥厂桥; 样点11: 健康西路桥; 样点12: 双桥河大桥

值受温度和季节等因素影响较大,总体呈先下降后上升趋势,而浊度呈波动上升趋势。同时,底泥疏浚河段中磷含量总体呈下降趋势,其中总磷浓度下降了 19.09%,尽管显著下降后小幅上升,但疏浚后的浓度 0.09 mg/L 仍低于疏浚前 0.11 mg/L;可溶性磷的浓度从疏浚前的 0.05 mg/L 上升至疏浚中的 0.08 mg/L,后又下降至疏浚后的 0.04 mg/L,呈先上升后下降趋势。疏浚河段氮含量呈显著下降后小幅上升趋势,但疏浚后氮浓度仍显著低于疏浚前。总氮含量大幅削减,较疏浚前下降了 48.09%;氨氮浓度从疏浚前的 2.22 mg/L 下降至 0.86 mg/L;硝态氮浓度从 3.75 mg/L 下降至 1.50 mg/L;可溶性氮浓度从 6.14 mg/L 下降至疏浚后的 3.01 mg/L,其中氨氮含量削减幅度最大(表 1)。

表 1 双桥河底泥疏浚前后水质理化特征

Table 1 Physicochemical characteristics of Shuangqiao River in different sediment dredging period

理化因子 Physicochemical factors	未疏浚段 Undredging reach				疏浚段 Dredging reach			
	6月 June	9月 September	12月 December	3月 March	6月 June	9月 September	12月 December	3月 March
T/°C	27.55±1.49	21.55±0.26	9.50±0.87	19.63±1.56	30.40±1.62	23.51±1.38	7.80±0.55	19.16±0.73
DO/(mg/L)	9.08±1.75	8.40±0.59	9.08±2.39	10.42±2.17	7.06±1.25	3.03±0.36	13.12±3.79	6.94±1.02
pH	9.94±0.65	7.78±0.44	7.91±0.06	8.30±0.13	9.30±0.92	7.61±0.37	8.13±0.13	8.09±0.12
Turbidity/(NTU)	11.38±8.01	15.36±9.91	4.68±1.62	5.85±1.41	20.64±6.34	36.11±5.56	26.70±8.49	41.34±23.57
TDP/(mg/L)	0.07±0.02	0.08±0.01	0.09±0.01	0.08±0.05	0.05±0.02	0.08±0.01	0.07±0.01	0.04±0.01
TP/(mg/L)	0.09±0.03	0.09±0.01	0.10±0.01	0.14±0.10	0.11±0.03	0.09±0.01	0.08±0.01	0.09±0.04
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.33±0.16	0.42±0.10	0.33±0.06	0.49±0.11	2.22±0.84	0.21±0.12	0.11±0.09	0.86±0.20
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	2.11±0.66	2.06±0.32	2.19±0.49	2.09±0.24	3.75±1.33	0.56±0.26	0.41±0.34	1.50±0.35
TDN/(mg/L)	4.13±0.47	4.04±0.65	4.13±0.85	4.07±0.29	6.14±0.96	2.67±0.81	2.21±0.46	3.01±0.55
TN/(mg/L)	4.59±0.21	4.75±0.70	4.65±0.65	4.59±0.26	6.95±0.84	2.96±0.82	2.43±0.40	3.61±0.59

T: 温度 Temperature; DO: 溶解氧 Dissolved Oxygen; TDP: 可溶性磷 Total Dissolved Phosphorus; TP: 总磷 Total Phosphorus; NH₄⁺-N: 氨氮 Ammonium Nitrogen; NO₃⁻-N: 硝态氮 Nitrate Nitrogen; TDN: 可溶性氮 Total Dissolved Nitrogen; TN: 总氮 Total Nitrogen

2.2 浮游植物种类、密度、生物量和生物多样性指数分析

研究期间,在双桥河共检测到浮游植物 8 门 53 属 71 种,隶属于蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门、裸藻门、甲藻门、金藻门和黄藻门。研究中,从浮游植物的相对密度上看,未疏浚河段和疏浚河段浮游植物群落主要由蓝藻门-硅藻门-绿藻门组成,蓝藻门的相对密度在所有采样点均占 50% 以上(图 2)。从浮游植物生物量上看,底泥疏浚前,随着水体中营养盐浓度的升高,疏浚河段的浮游植物生物量远高于未疏浚河段;而底泥疏浚后,疏浚河段生物量随着营养盐浓度的降低大幅下降,未疏浚河段的生物量无显著差异(图 3)。疏浚河段的浮游植物平均密度为 2.866×10^6 个/L,其中底泥疏浚前(6月)平均密度为 3.875×10^6 个/L,疏浚中(9月)平均密度为 6.952×10^6 个/L,疏浚后(12月,3月)平均密度分别为 0.308×10^6 、 0.330×10^6 个/L。浮游植物平均生物量为 3.35 mg/L。底泥疏浚前,疏浚河段浮游植物平均生物量为 3.32 mg/L,疏浚中,平均生物量为 8.66 mg/L,疏浚后平均生物量分别为 0.68、0.74 mg/L。随着底泥疏浚过程的推进,尽管蓝藻门的密度在 3 次采样中均占所有浮游植物的 90% 以上,但蓝藻门的生物量持续下降,而硅藻门的生物量呈持续上升趋势,并在底泥疏浚后的两次采样中,硅藻门生物量在总生物量中占 60% 以上(图 4)。底泥疏浚后,浮游植物密度和生物量分别下降了 91.48% 和 77.71%。通过计算研究期间各采样点的 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰富度指数,并对其进行分析,发现各采样点的 3 种多样性指数随着季节和底泥疏浚阶段的不同而变化,呈现出较大幅度的波动(图 5)。其中 Shannon-Wiener 指数在 0.40—2.61 之间, Pielou 均匀度指数在 0.13—0.72 之间, Margalef 丰富度指数在 0.81—3.37 之间,指示水体污染程度为中-重污染。

2.3 浮游植物功能群分类及主要功能群分析

研究期间,根据浮游植物功能群 FG 分类法,双桥河浮游植物可分为 23 个功能群: M、H1、H2、MP、S1、L₀、X2、X1、J、F、N、G、X3、C、D、Y、W1、L_M、E、T、S_N、K、P 功能群(表 2)。底泥疏浚前和疏浚中,双桥河浮游植物功

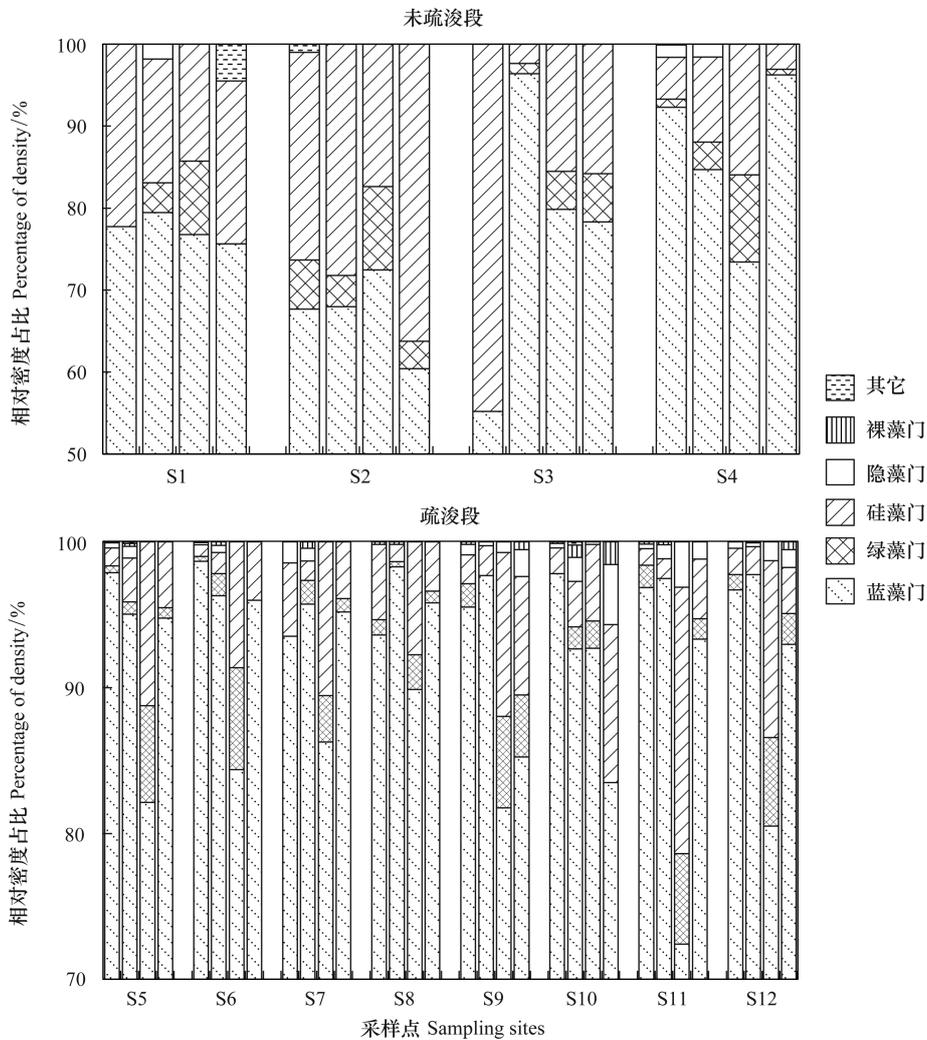


图 2 双桥河未疏浚段与疏浚段浮游植物相对密度占比

Fig.2 Percentage of density of phylum phytoplankton in the undredging and dredging reach in different sampling sites of Shuangqiao River

能群数量与组成一致,共 18 个,分别为 M、H1、H2、MP、S1、L₀、X2、X1、J、F、N、G、X3、Y、W1、L_M、E、T;底泥疏浚后,浮游植物功能群增加至 22 个,为 M、H1、H2、MP、S1、L₀、X2、X1、J、F、N、G、C、D、Y、W1、L_M、E、T、S_N、K、P。浮游植物优势功能群以优势度 $Y \geq 0.02$ 确定。从底泥疏浚工程不同阶段来看,双桥河底泥疏浚前的浮游植物优势功能群为 M、MP、P、W1、Y;底泥疏浚中为 L_M、M、MP、P、W1、Y;底泥疏浚后为 C、F、J、M、MP、P、Y。其中, M、MP 的优势度均大于 0.2,成为双桥河浮游植物的绝对优势功能群。

从底泥疏浚不同阶段各采样点浮游植物功能群组成来看(图 6),底泥疏浚前,C、M、MP 在每个采样点均有分布,W1 和 Y 也分布于大多数点,主要功能群为 M+MP+C;底泥疏浚中,M、MP、P 在各点均有分布,Y 在除 8 号点外均有分布,主要功能群为 M+MP;底泥疏浚后初期(12 月),F、L₀、M 在各点均有出现,MP 除 12 号点外均有出现,主要功能群转变为 M+MP+L₀+F;底泥疏浚半年后(3 月),M、MP、P 在各点均有出现,Y 大量出现在 8—12 号采样点,主要功能群转变为 M+MP+P。M 在底泥疏浚的所有时期,在各采样点均占有绝对优势。

2.4 浮游植物功能群与环境因子之间关系分析

对数据进行去趋势对应分析(DCA),结果显示排序轴<3,故对浮游植物功能群与环境因子间的关系采用冗余分析(RDA)。结果表明,第一轴与第二轴的特征值分别为 0.698 和 0.046,4 个排序轴对物种与环境因子

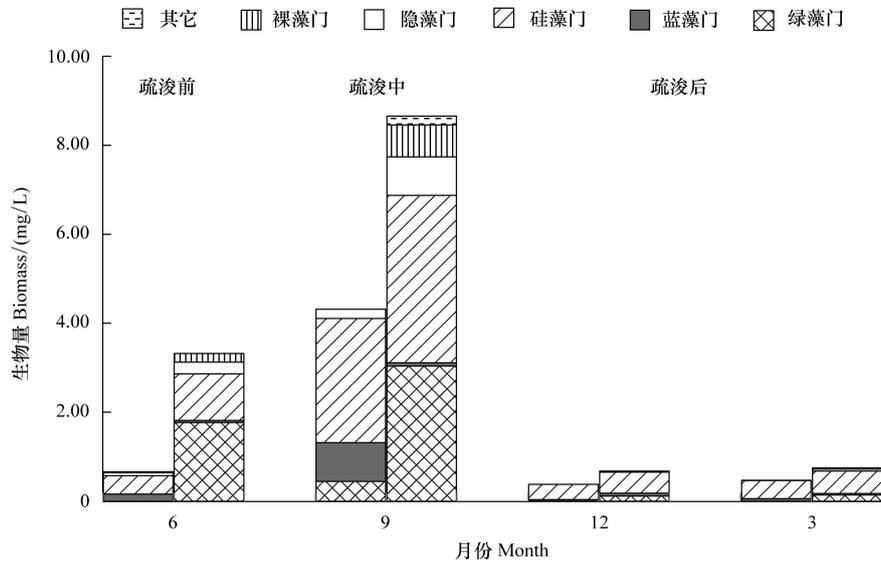


图 3 双桥河未疏浚与疏浚河段采样点生物量

Fig.3 Biomass of phylum phytoplankton in the undredging and dredging reach in different sampling sites of Shuangqiao River
每个月份两个柱状图分别代表未疏浚和疏浚河段的浮游植物生物量

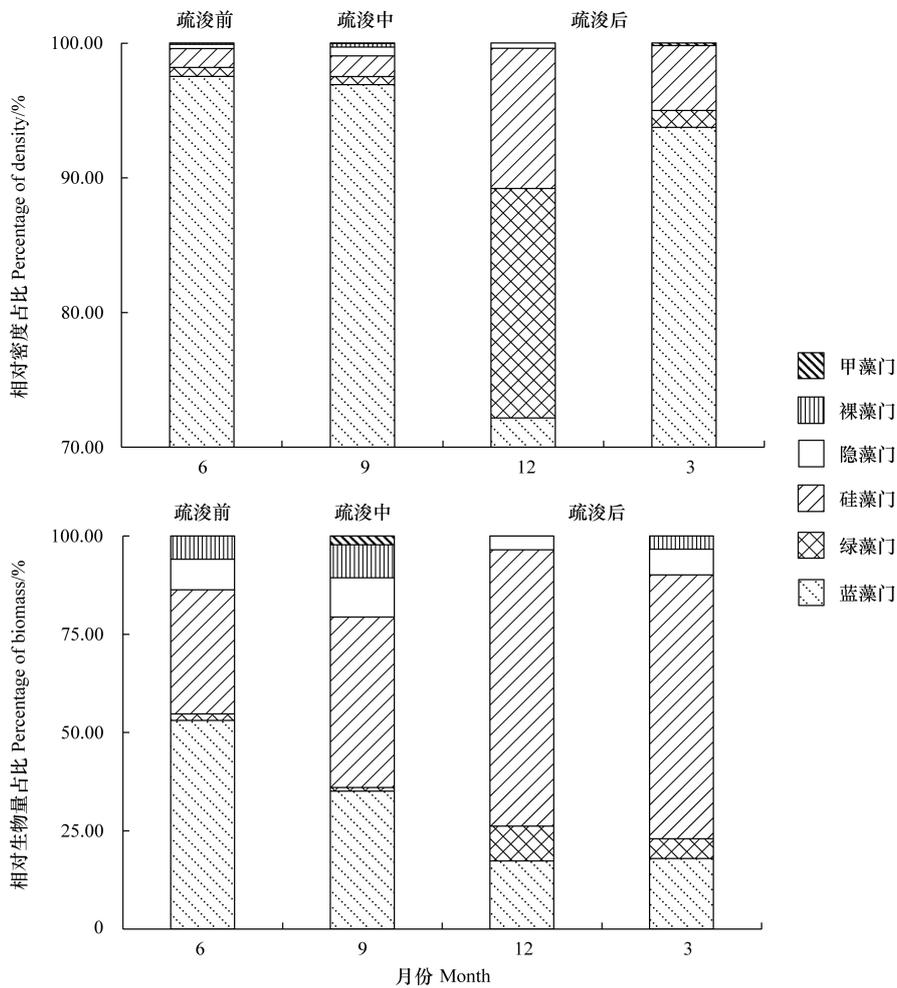


图 4 双桥河底泥疏浚前后各类藻门密度和生物量占比

Fig.4 Percentage of density and biomass of each phylum phytoplankton in Shuangqiao River

表 2 双桥河浮游植物功能群划分^[7-8]Table 2 Phytoplankton functional groups division in Shuangqiao River^[7-8]

功能群 FG	代表属(种) Typical representatives	习性特征 Habitat and tolerances
C	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.、星杆藻 <i>Asterionella</i> sp.	混合的、富营养、中小型水体
D	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	浅水、浑浊水体
F	卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.、蹄形藻 <i>Kirchneriella</i> sp.	洁净变温层、低营养、强浑浊
H2	鱼腥藻 <i>Dolichospermum</i> sp.	中营养、深水、低氮
J	空星藻 <i>Coelastrum</i> sp.、盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.、栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.、 十字藻 <i>Crucigenia</i> sp.、四角藻 <i>Tetraedron</i>	浅水、富营养、低光照、混合
K	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i> sp.	富营养小型浅水
L ₀	色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.、平裂藻 <i>Merismopedia</i> sp.	贫到富营养、中到大型水体、持久或深度混合
L _M	角甲藻 <i>Ceratium</i> sp.	富到超富营养、低碳、混合
M	微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	小到中型、富营养到超富营养、稳定、透明度较高、强光照
MP	颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.、颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i> 、 舟形藻 <i>Navicula</i> sp.、双菱藻 <i>Surirella</i> sp.	搅动、浑浊、浅水
N	角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp.、鼓藻 <i>Cosmarium</i> sp.	贫营养的变温层
P	脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.、桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.	富营养的变温层、低光照
S _N	念珠藻 <i>Nostocales</i> sp.	温暖、混合、低氮
W1	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	小型有机水体、浅水、高 BOD
X1	纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> sp.	超富营养、浅水
Y	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	静水环境、低光照
H1	束丝藻 <i>Aphanizomenon</i> sp.	低氮、低碳、混合、低光照
S1	蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i> sp.	混合、浑浊
X2	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> sp.	浅水、中营养、混合
G	实球藻 <i>Pandorina</i> sp.、空球藻 <i>Eudorina</i> sp.	富营养水体、高光照
X3	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	浅水、洁净混合层
E	锥囊藻 <i>Dinobryon</i> sp.	贫营养小型水体
T	黄丝藻 <i>Tribonema</i> sp.	深水、低光照

FG: 功能群 Functional Groups

的累计方差为 99.0%, 累积解释 76.7%, 表明浮游植物功能群与环境因子之间存在明显的相关性(表 3)。蒙特卡洛(Monte Carlo)置换检验表明 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN/TP、T 为影响浮游植物功能群的主要因素(图 7)。同时, 选取浮游植物优势功能群生物量与环境因子进行 Pearson 相关性分析。综合两种分析结果, 发现 M(主要由微囊藻组成)、MP、P、W1 功能群与 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN 等氮营养盐含量和温度呈极显著正相关; C 功能群与 TN($r = -0.385, P < 0.05$) 呈显著负相关, 与浊度($r = 0.405, P < 0.05$) 呈显著正相关; F 功能群与 NO₃⁻-N($r = -0.360, P < 0.05$) 呈显著负相关, 与浊度($r = 0.438, P < 0.05$) 呈显著正相关; J 功能群与 NH₄⁺-N 呈极显著正相关($r = 0.579, P < 0.01$), 与 TDN($r = 0.383, P < 0.05$)、TN($r = 0.390, P < 0.05$) 呈显著正相关(表 4)。通过对比各环境因子的影响程度, 发现双桥河的氮营养盐含量对浮游植物功能群影响显著。

表 3 浮游植物优势功能群与环境因子间冗余分析(RDA)的统计参数

Table 3 Statistical parameters of RDA analysis between the phytoplankton dominant functional groups and environmental variables

轴 Axes	1	2	3	4	合计 Total variance
特征值 Eigenvalues					
物种-环境相关性 Species-environment correlations	0.698	0.046	0.015	0.008	1
物种累积方差 Cumulative percentage variance of species data	69.8	74.4	75.9	76.7	
物种-环境关系累积方差 Cumulative percentage variance of species-environment relation	90.1	96	97.9	99	
所有特征值之和 Sum of all eigenvalues					1
所有典范特征值之和 Sum of all canonical eigenvalues					0.775

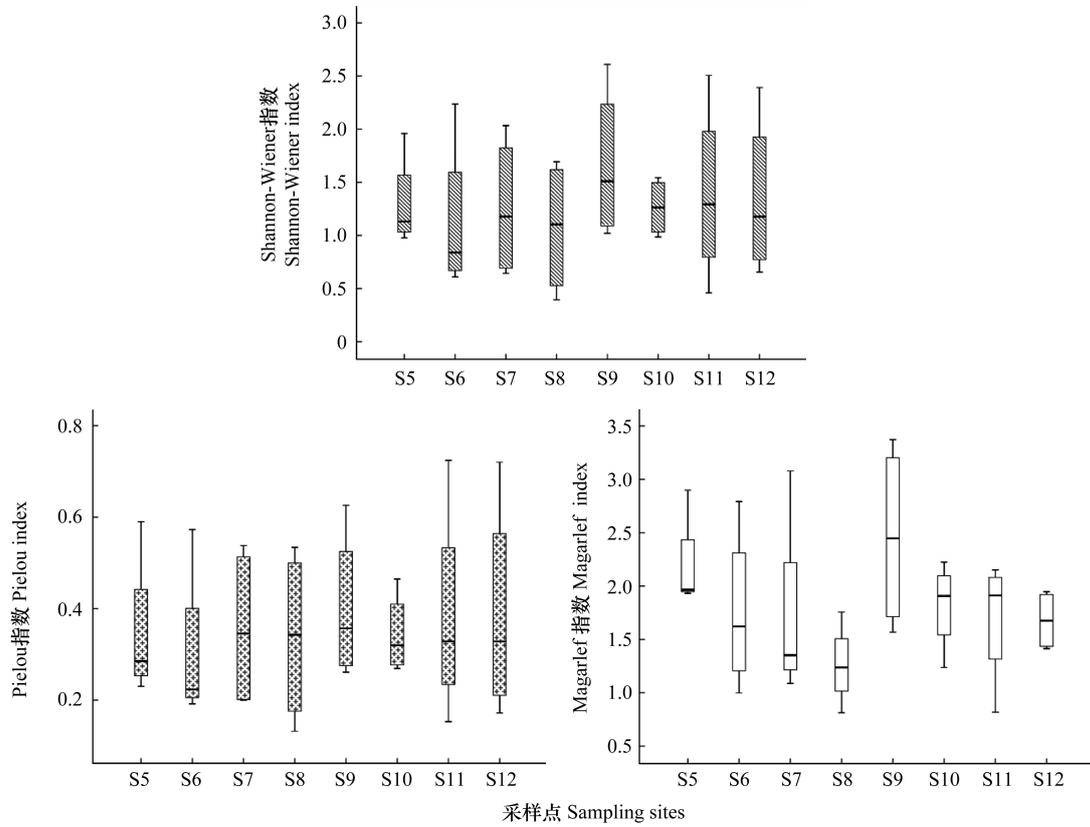


图 5 双桥河疏浚段各采样点浮游植物多样性指数

Fig.5 Phytoplankton diversity index on dredging reach in different sampling sites of Shuangqiao River

表 4 浮游植物优势功能群生物量与水环境因子的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlation coefficient of biomass of dominance of phytoplankton functional groups and water quality parameters

功能群 FG	氨氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	可溶性氮 TDN	总氮 TN	总磷 TP	可溶性磷 TDP	氮磷比 TN/TP	温度 T	浊度 Turbidity
M	0.720 **	0.670 **	0.694 **	0.736 **	0.370 *	-0.586 **	0.477 **	0.607 **	-0.276
MP	0.748 **	0.674 **	0.763 **	0.732 **	0.232	-0.399 *	0.591 **	0.571 **	-0.170
J	0.579 **	0.305	0.383 *	0.390 *	0.419 *	0.016	0.042	0.360 *	-0.224
P	0.724 **	0.738 **	0.813 **	0.788 **	0.136	-0.215	0.649 **	0.481 **	-0.390 *
C	-0.300	-0.270	-0.227	-0.385 *	-0.088	0.345	-0.223	0.335	0.405 *
F	-0.347	-0.360 *	-0.237	-0.271	-0.084	0.403 *	-0.247	-0.120	0.438 *
L _M	0.219	0.382	0.387	0.337	-0.114	-0.152	0.451	0.194	-0.172
W1	0.682 **	0.694 **	0.734 **	0.700 **	0.144	-0.199	0.562 **	0.497 **	-0.302
Y	0.725 **	0.765 **	0.798 **	0.762 **	0.133	-0.229	0.642 **	0.566 **	-0.275

TN/TP: 氮磷比 Total Nitrogen/Total Phosphorus; *, 在 0.05 水平上显著相关(双侧); **, 在 0.01 水平上显著相关(双侧)

3 讨论

3.1 底泥疏浚对双桥河水质和浮游植物群落的影响

本研究中,对双桥河水质指标分析发现,底泥疏浚后双桥河的氮、磷营养盐浓度总体呈下降趋势。其中,总氮浓度下降了 48.09%,总磷浓度下降了 19.09%,双桥河夏季的底泥疏浚工程对水体总氮的削减能力强于总磷。尽管底泥疏浚一段时间后,双桥河周边污水的排入会引起水体表层有机碎屑再悬浮,形成的新内污染源;加之双桥河春季降水较少,水体污染的累积造成水体营养盐浓度重新上升^[11,18],但本研究中,双桥河底泥

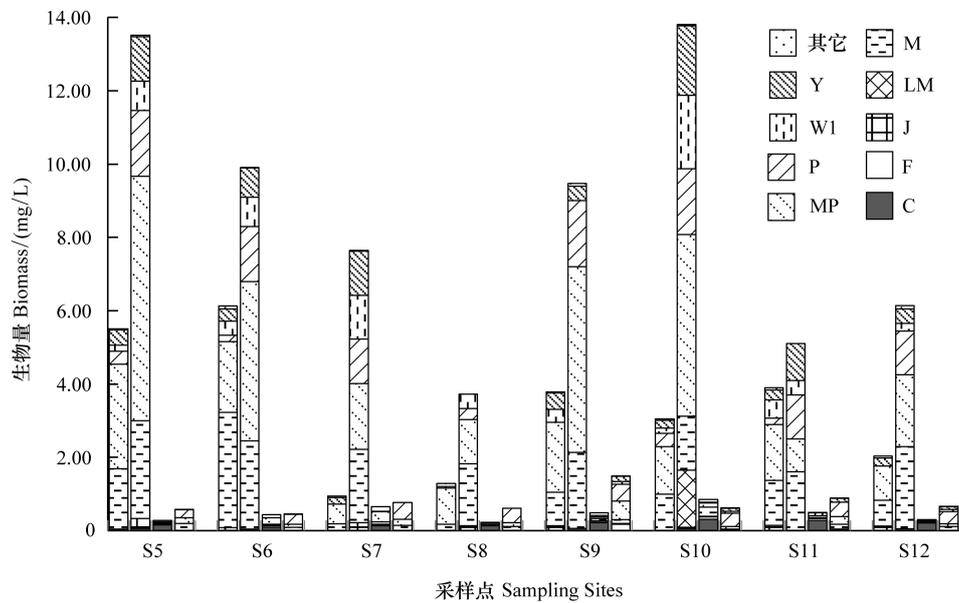


图 6 双桥河底泥疏浚不同时期各采样点浮游植物功能群组成

Fig.6 Composition of phytoplankton functional groups in different periods in Shuangqiao River

每个采样点 4 个柱状图分别代表 4 次采样各点的浮游植物功能群生物量; Y:隐藻 *Cryptomonas* sp.; W1:裸藻 *Euglena* sp.; P:脆杆藻 *Fragilaria* sp.、桥弯藻 *Cymbella* sp.; MP:颤藻 *Oscillatoria* sp.、颗粒直链藻 *Melosira granulata*、舟形藻 *Navicula* sp.、双菱藻 *Surirella* sp.; M:微囊藻 *Microcystis* sp.; LM:角甲藻 *Ceratium* sp. J:空星藻 *Coelastrum* sp.、盘星藻 *Pediastrum* sp.、栅藻 *Scenedesmus* sp.、十字藻 *Crucigenia* sp.、四角藻 *Tetraedron* sp.; F:卵囊藻 *Oocystis* sp.、蹄形藻 *Kirchneriella* sp.; C:小环藻 *Cyclotella* sp.、星杆藻 *Asterionella* sp.

疏浚工程能造成营养盐的显著削减和水环境质量的提高。王书航等^[19]的研究发现巢湖流域的城市污染控制型河流输入湖泊中的总氮、总磷含量分别占全部入湖河流污染负荷的 72.27% 和 60.14%。其中,研究发现巢湖双桥河水质主要受有机污染影响,有机污染矿化分解消耗水体溶解氧,提升了水体营养盐水平,导致水体水质下降。同时,入湖区 Chl a 浓度与入湖河流氨氮、总氮的输入量呈显著正相关,入湖河流中总氮的高输入量能显著增加藻类生物量,而通过削减入湖河流中总氮的输入量也可能减少藻类生物量。本研究发现,底泥疏浚过程中随着水体总氮浓度的下降,河流藻类密度有显著的下降,疏浚段与未疏浚段的藻类生物量差异也逐渐缩小。同时,小型藻类的大量出现也造成了藻类生物量的显著下降^[20-22]。从双桥河浮游植物群落结构来看,四次采样过程中蓝藻门的微囊藻属均以优势种出现,而在底泥疏浚后的 3 月份,浮游植物优势种又出现了硅藻门的直链藻属和小环藻属。本研究,双桥河浮游植物的群落演替规律与一般富营养化水体中夏末秋初蓝藻取代其他藻类在水体占据优势地位的演替规律相似^[23]。研究表明底泥疏浚不会改变浮游植物群落季节演替规律,而绿藻门在夏季并未占优势可能与夏季浮游动物的摄食作用有关^[23]。同时,在未疏浚河段与疏浚河段,底泥疏浚前与疏浚后,浮游植物群落的组成均稳定在蓝藻门-硅藻门-绿藻门状态,表明底泥疏浚对浮游植物群落结构组成并无显著影响。尽管底泥疏浚后双桥河

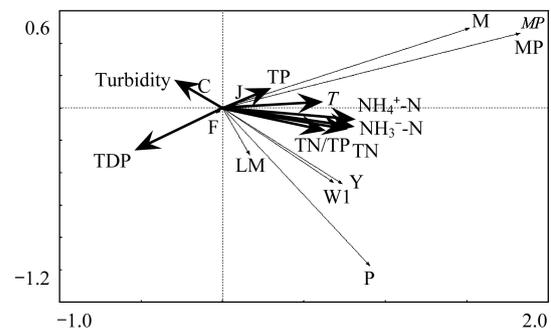


图 7 巢湖浮游植物功能群与主要环境因子的 RDA 分析

Fig.7 RDA analysis of phytoplankton functional groups and environment factors in Shuangqiao River

T:温度 Temperature; DO:溶解氧 Dissolved Oxygen; TDP:可溶性磷 Total Dissolved Phosphorus; TP:总磷 Total Phosphorus; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:氨氮 Ammonium Nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝态氮 Nitrate Nitrogen; TDN:可溶性氮 Total Dissolved Nitrogen; TN:总氮 Total Nitrogen; TN/TP:氮磷比 Total Nitrogen/Total Phosphorus

浮游植物密度和生物量分别下降了 91.48% 和 77.71%, 但总体而言, 双桥河底泥疏浚后水体中的浮游植物密度和生物量仍处于较高水平, 底泥疏浚工程并未改变双桥河水生生态系统处于中-富营养水平的现状。此外, 浮游植物多样性指数随着季节和底泥疏浚程度的不同而呈现较大幅度的波动。底泥疏浚后初期(12月), 3种多样性指数的平均值较疏浚前和疏浚中均有提升, 这表明在底泥疏浚后初期, 双桥河的水质较底泥疏浚前有所改善。但是, 在底泥疏浚半年后(3月), 3种多样性指数平均值有所降低, 3种指数变化的主要原因为双桥河温度的变化、浮游植物季节演替及营养盐浓度的变化。综合双桥河底泥疏浚后的水质理化指标、浮游植物优势种、浮游植物密度与生物量及生物多样性指数分析发现, 双桥河是巢湖入湖河流中污染较为严重的河流, 其水质主要受城市污染控制, 底泥疏浚工程能够显著削减水体中的营养盐含量, 降低浮游植物密度与生物量, 提升生物多样性指数, 然而对浮游植物的种类组成影响不大。

3.2 双桥河浮游植物功能群分类

根据浮游植物功能群 FG 分类法, 研究中双桥河浮游植物可分为 23 个功能群。与湖泊中浮游植物功能群相比, 双桥河的浮游植物绝对优势功能群为以蓝藻为主的 M 功能群和硅藻为主的 MP、P 功能群。优势功能群 M (以微囊藻为主) 主要在夏季高温期出现, 在双桥河各采样点均有分布。M 功能群是富营养化水体常见的类群, 表征了巢湖双桥河的富营养化现状。同时, M 类功能群的优势地位与温度有密切联系, 这与前人研究 M 类功能群易受低温条件限制的结论一致^[24-25]。一般研究认为, 夏秋的高温 and 强光照可以促使微囊藻大量繁殖, 导致 M 功能群的生物量大大增加, 使得水体中溶解氧大幅下降, 从而对水体水质产生负面影响^[26-28]。因此, 水体中 M 类功能群生物量过高时, 常会导致水体中的溶解氧下降^[29]。MP 功能群(颤藻 *Oscillatoria* sp.、颗粒直链藻 *Melosira granulata*、舟形藻 *Navicula* sp. 和双菱藻 *Surirella* sp.) 主要生活在不稳定且浑浊的水体中, 双桥河底泥疏浚过程中水体扰动和水质浑浊, 从一定程度上可以促进 MP 功能群的生长, 因此 MP 功能群易在河流生态系统中占优势地位^[30]。同时, 在 12 月、3 月两次采样中, MP 功能群广泛分布于采样点中。MP 功能群多出现于浅水环境中, 冬春季节双桥河地区降水较少, 河道中水体较浅, 也为 MP 功能群生长提供了良好的环境。而 P 功能群(脆杆藻 *Fragilaria* sp. 和桥弯藻 *Cymbella* sp.) 多生活于营养丰富的浅水环境中, 且耐受低光照^[31]。P 功能群在 3 月采样点中均有出现, 可能由于春季双桥河降水较少, 水位下降, 水体透光性差, 透明度偏低, 为 P 功能群藻类生长提供了良好的环境。与前人研究的河流和湖泊浮游植物功能群分类相比, 双桥河地区的农业生产导致浮游植物功能群分类与呼兰河湿地相似, 表现为 W1(裸藻 *Euglena* sp.) 功能群占据优势地位。然而与呼兰河和巢湖不同的是, 双桥河浮游植物功能群中的 H2 功能群(以鱼腥藻为主) 并不占优势地位。研究发现 H2 功能群适应富营养水体, 且与总磷呈正相关, 水体中较高营养盐尤其是磷利于其生长^[32-33]。而本研究中, 双桥河多次底泥疏浚后, 水体中磷营养盐的含量显著下降, 猜想这可能是 H2 功能群并未大量出现的主要原因^[11, 33]。此外, 也可能与微囊藻对其的抑制作用有关^[17]。因此, 研究巢湖双桥河水生态系统中藻类优势功能群的形成原因, 对分析巢湖中浮游植物群落变化及优势功能群的起源有积极的意义。

3.3 底泥疏浚工程对浮游植物功能群的影响

与前人研究相似的是, 双桥河的底泥疏浚工程可以显著削减水体中的氮、磷营养盐含量, 并由此对浮游植物造成影响^[13]。尽管本研究中, 底泥疏浚并未改变双桥河以 M+MP 为绝对优势功能群的现状, 但 RDA 分析和 Pearson 相关性研究发现结果表明, 双桥河浮游藻类优势功能群 M、MP、P 等均与总氮含量显著相关。双桥河浮游藻类优势功能群由底泥疏浚前的 M、MP、P、W1(裸藻 *Euglena* sp.)、Y(隐藻 *Cryptomonas* sp.), 转变为底泥疏浚后为 C、F、J、M、MP、P、Y。其中, 适应高 BOD、浅水小型有机水体的 W1 功能群在底泥疏浚前分布于大多数采样点, 而疏浚后显著减少, 可能表明底泥疏浚工程有降低有机污染, 降低大型藻类-裸藻生物量的作用。此外, W1 功能群与总氮含量呈极显著正相关, 其生物量的下降也可能与底泥疏浚造成的总氮含量显著下降有关。而功能群 C(小环藻 *Cyclotella* sp.、星杆藻 *Asterionella* sp.)、F(卵囊藻 *Oocystis* sp.、蹄形藻 *Kirchneriella* sp.)、J(栅藻 *Scenedesmus* sp.、十字藻 *Crucigenia* sp.) 在底泥疏浚后转变为优势功能群, 猜想与总氮浓度下降对

C 功能群(主要由适应低温的硅藻门藻类组成)的影响有关,这也与陈楠等^[30]和潘翰等^[31]的研究结论一致。功能群 C、F 适应于高浑浊的水体中,而 J 功能群适应于浅水环境中,这与双桥河底泥疏浚后的环境状况相适应。底泥疏浚工程可以降低双桥河总氮的输入总量,而氮对浮游植物功能群的影响显著高于其他环境因子,且双桥河水体中的藻类优势功能群 M(主要由微囊藻组成)、MP 功能群均与氮营养盐含量呈显著性相关。一般来说,随着水体营养盐浓度的下降,水生生物会显示出种类增多、数量减少的特征^[29]。因此,底泥疏浚和双桥河外源氮营养盐的削减,可以改善双桥河的浮游植物群落结构,促使对营养波动不敏感的 C、F、J 功能群取代了对水体氮浓度波动敏感的 W1 类功能群,也有可能减少水体中对氮浓度波动敏感的 M 类功能群(微囊藻)的生物量,降低其水华爆发的几率^[34-36]。双桥河底泥疏浚工程削减水体中的氮营养盐含量对降低水体藻类生物量和提升水环境质量有积极的意义。本研究认为,河流底泥疏浚工程的实施,在降低水体污染程度的同时,减少了对氮敏感的浮游植物物种出现,促进了对营养盐不敏感种类生物量的增加,密切了浮游植物生物量与营养物质含量之间的联系,进而促使了河流水生生态系统向健康、安全的方向发展。

综合本次研究结果,双桥河为氮限制型河流。底泥疏浚工程显著削减水体中氮营养盐的含量,但底泥疏浚后双桥河水体中营养盐的含量、浮游植物的密度、生物量和生物多样性指数表明双桥河仍处于中-富营养状态。双桥河的浮游植物绝对优势功能群为以蓝藻为主的 M 功能群和硅藻为主的 MP、P 功能群。底泥疏浚工程的高氮削减可以造成 W1 功能群生物量的下降,而 C、F、J 功能群因其对营养波动不敏感且疏浚对水体的扰动,在疏浚后生物量有所增加。由于双桥河河流生态系统的强变换性,且对巢湖生态系统较高的贡献率,双桥河底泥疏浚工程可以对巢湖藻类功能群分布格局造成一定的影响。因此我们认为,双桥河底泥疏浚工程在改善河流浮游植物生态功能,减轻河流污染程度上有积极的作用。同时,双桥河底泥疏浚工程的实施也有利于巢湖富营养化的治理和蓝藻水华的控制。

致谢:中国科学院水生生物研究所崔永德、张啸林同志和安徽农业大学资源与环境学院田昊瞳、李明媛、王箫璇、王林、张寅生同学协助部分野外采样工作,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [2] Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. *Limnologia*, 2004, 34(3): 236-248.
- [3] Rodrigues L C, Simões N R, Bovo-Scomparin V M, Jati S, Santana N F, Roberto M C, Train S. Phytoplankton alpha diversity as an indicator of environmental changes in a neotropical floodplain. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 334-341.
- [4] Huszar De M V L, Nina F C. The relationship between phytoplankton composition and physical-chemical variables: a comparison of taxonomic and morphological-functional descriptors in six temperate lakes. *Freshwater Biology*, 2010, 40(4): 679-696.
- [5] Ptacnik R, Solimini A G, Brettum P. Performance of a new phytoplankton composition metric along a eutrophication gradient in Nordic lakes. *Hydrobiologia*, 2009, 633(1): 75-82.
- [6] Suikkanen S, Laamanen M, Huttunen M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(3/4): 580-592.
- [7] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 韩博平. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 11-23.
- [8] 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.
- [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] 司马小峰, 朱文涛, 方涛. 疏浚对巢湖双桥河水环境容量的影响. *环境工程学报*, 2012, 6(7): 2207-2214.
- [11] 王广召, 方涛, 唐巍, 司马小峰. 疏浚对巢湖重污染入湖河流沉积物中污染物赋存及释放的影响. *湖泊科学*, 2014, 26(6): 837-843.
- [12] 许炼烽, 邓绍龙, 陈继鑫, 夏钟文. 河流底泥污染及其控制与修复. *生态环境学报*, 2014, 23(10): 1708-1715.
- [13] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 胡维平, 范成新. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? *湖泊科学*, 2000, 12(3): 269-279.

- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 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.
- [16] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [17] 王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素. 湖泊科学, 2018, 30(2): 431-440.
- [18] Nayar S, Miller D J, Hunt A, Goh B P L, Chou L M. Environmental effects of dredging on sediment nutrients, carbon and granulometry in a tropical estuary. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 127(1/3): 1-13.
- [19] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析. 环境科学, 2011, 32(10): 2834-2839.
- [20] 刘林峰, 周先华, 高健, 刘梅群, 潘晓斌, 贺磊, 蔡世耀, 赵以军, 潘超, 王弄君, 张佳敏, 叶有旺, 刘伟. 神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价. 湖泊科学, 2018, 30(2): 417-430.
- [21] 赵先富, 于军, 葛建华, 刘国祥, 胡征宇. 青岛棘洪滩水库浮游藻类状况及水质评价. 水生生物学报, 2005, 29(6): 639-644.
- [22] 王俊莉, 刘冬燕, 古滨河, 李东京, 吴明妹. 基于浮游植物群落的安徽太平湖水环境生态评价. 湖泊科学, 2014, 26(6): 939-947.
- [23] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 1986, 106(4): 433-471.
- [24] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999.
- [25] Blinn D W. Diatom community structure along physicochemical gradients in saline lakes. *Ecology*, 1993, 74(4): 1246-1263.
- [26] Elliott J A, Jones I D, Thackeray S J. Testing the sensitivity of phytoplankton communities to changes in water temperature and nutrient load, in a temperate lake. *Hydrobiologia*, 2006, 559(1): 401-411.
- [27] Edwards K F, Thomas M K, Klausmeier C A, Litchman E. Phytoplankton growth and the interaction of light and temperature: a synthesis at the species and community level. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61(4): 1232-1244.
- [28] 陈海生, 严力蛟. 浙江省长潭水库溶解氧变化特性及其与水温相关性. 科技通报, 2015, 31(3): 249-253.
- [29] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 焦立新, 刘滨, 金相灿. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系. 环境科学, 2011, 32(7): 1952-1959.
- [30] 陈楠, 王莹, 杨天雄, 于洪贤, 马成学. 太湖夏季浮游植物功能群特征及水质状况. 东北林业大学学报, 2018, 46(3): 69-73.
- [31] 潘翰, 刘琰冉, 马成学. 北方寒冷内陆碱性水体蓝藻暴发特点及影响因子. 东北林业大学学报, 2017, 45(7): 79-83.
- [32] Padišák 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.
- [33] 曾娟, 刘德富. 磷营养盐对库湾暴发蓝藻水华的实验研究. 三峡大学学报: 自然科学版, 2008, 30(5): 22-24.
- [34] Biggs B J F. The contribution of flood disturbance, catchment geology and land use to the habitat template of periphyton in stream ecosystems. *Freshwater Biology*, 1995, 33(3): 419-438.
- [35] Wang X L, Lu Y L, He G Z, Han J Y, Wang T Y. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: a 5-year study. *Journal of Environmental Science*, 2007, 19(8): 920-927.
- [36] Søndergaard M, Lauridsen T L, Johansson L S, Jeppesen E. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover. *Hydrobiologia*, 2017, 795(1): 35-48.