

模拟双水源混合水体附着藻群落结构演替特征

于子雯¹, 张新月², 张祚彬¹, 冀睿¹, 王茁龙¹, 乔之怡^{1*}

¹天津农学院水产学院, 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津

²天津天滨同盛环境科技有限公司, 天津

收稿日期: 2026年5月22日; 录用日期: 2026年6月14日; 发布日期: 2026年6月24日

摘要

为探究调水背景下北方水库附着藻的建群规律及其与水环境因子的关系, 以南水北调中线天津段重要调蓄水库——尔王庄水库为对象, 开展室内模拟混水试验。室内混水试验依据引江水和引滦水设置5个混水比例, 2个水深梯度(距表层10 cm和60 cm)开展研究。结果表明: 室内模拟混水中附着藻隶属于4门29科42属66种, 其中绿藻门种数占比最高, 为45.45%; 蓝藻门为27.27%, 硅藻门为25.76%; 金藻门仅1种。蓝藻门优势种数量最多(7种), 湖生假鱼腥藻、长孢藻、游丝藻等在整个试验周期内均持续作为优势种出现。混水比例对不同藻门的影响存在明显差异。统计分析表明, 硅藻门生物量受混水比例影响极显著($P < 0.001$), 其中A2组显著高于A1、A3和A5, 说明A2的水源比例更有利于硅藻积累。混水比例对附着藻多样性的影响主要体现在物种丰富度层面, 且表层水层对比例变化更敏感。不同混水比例对附着藻群落的影响主要体现在物种丰富度和综合多样性水平, 而对群落均匀度的影响相对较弱。在10 cm水层, 不同混水比例对Shannon-Wiener指数和Margalef指数均具有显著影响($P < 0.01$), 在60 cm水层, Margalef丰富度指数仍表现出显著差异($P < 0.01$)。冗余分析(RDA)表明, 本研究所测定的环境因子仅能解释小部分附着藻群落结构的变异, 群落大部分变异尚未得到解释。其中, pH是解释群落结构变异最重要的因子, 单因子贡献率为77.1%, 差异检验达到显著水平($P < 0.01$)。本研究阐明了不同混水比例、水深梯度、时间动态下附着藻的群落结构, 为混合水体水库的附着藻生长管理及水质生态调控提供科学依据和理论支持。

关键词

附着藻类, 南水北调工程, 室内模拟混水, 混水比例, 环境因子

Structural Succession Characteristics of Attached Algae Communities under Dual Water Source Mixing Conditions

Ziwen Yu¹, Xinyue Zhang², Zuobin Zhang¹, Rui Ji¹, Zhuolong Wang¹, Zhiyi Qiao^{1*}

*通讯作者。

文章引用: 于子雯, 张新月, 张祚彬, 冀睿, 王茁龙, 乔之怡. 模拟双水源混合水体附着藻群落结构演替特征[J]. 水产研究, 2026, 13(2): 210-223. DOI: 10.12677/ojfr.2026.132024

¹Key Laboratory of Aqua-Ecology and Aquaculture of Tianjin, College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin

²Tianjin Tianbin Tongsheng Environmental Technology Co., Ltd., Tianjin

Received: May 22, 2026; accepted: June 14, 2026; published: June 24, 2026

Abstract

To investigate the community colonization patterns of attached algae in northern reservoirs under water diversion conditions and their relationships with aquatic environmental factors, an indoor simulated water-mixing experiment was conducted using Erwangzhuang Reservoir, an important regulation reservoir in the Tianjin section of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project. The experiment included five mixing ratios of water from the Yangtze River and Luan River, and two water depth gradients (10 cm and 60 cm below the surface). The results showed that attached algae in the simulated mixtures belonged to 66 species, 42 genera, 29 families, and 4 phyla. Chlorophyta accounted for the highest proportion (45.45%), followed by Cyanophyta (27.27%) and Bacillariophyta (25.76%), while only one species was found in Chrysophyta. Cyanophyta had the most dominant species (7), and *Pseudanabaena mucicola*, *Dolichospermum* sp., and *Planctonema* sp. remained dominant throughout the test period. The effects of water-mixing ratios on different phyla varied significantly. Biomass of Bacillariophyta was extremely significantly affected by mixing ratios ($P < 0.001$), with Group A2 significantly higher than A1, A3, and A5, indicating that A2 was more favorable for diatom accumulation. Mixing ratios mainly affected species richness, and the surface layer was more sensitive to ratio changes, with weak effects on community evenness. At 10 cm, both Shannon-Wiener and Margalef indices differed significantly ($P < 0.01$); at 60 cm, only Margalef richness index differed significantly ($P < 0.01$). Redundancy analysis further indicated that pH was the most critical explanatory factor, with a single-factor contribution rate of 77.1% ($P < 0.01$). This study clarifies the community structure of attached algae under different mixing ratios, water depths and temporal dynamics, providing scientific basis and theoretical support for attached algae management and water quality ecological regulation in multi-water source reservoirs.

Keywords

Attached Algae, South-to-North Water Diversion Project, Indoor Simulated Water Mixing, Water Mixing Ratio, Environmental Factors

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

南水北调工程运行后,天津等北方受水区逐渐形成多水源联合供水格局。以尔王庄水库为例,引江水与引滦水在不同调度阶段以不同比例进入受水水体,导致水体营养盐组成、离子结构及酸碱度等理化特征发生变化,并可能进一步影响水生态系统稳定性。已有研究表明,外调水与本地水体之间存在明显的时空转换及贡献差异[1];山东省多水源调蓄水库研究中发现,多水源混合后理化要素与水生生物要素的存在时空变化,需要原水水质目标的风险因子识别与控制[2]。因此,在多水源混合背景下研究生态响应过程及其关键影响因子具有非常重要的理论和实践意义。

引滦水与引江水是天津段主要外调水源,二者在营养盐结构、离子组成与 pH 等方面存在差异,混合后会改变水环境条件,进而影响藻类定殖与群落演替。附着藻类(attached algae)是指附着在石块、人工基质或水生植物表面的藻类群体,是水体初级生产的组成部分,参与碳氮磷循环,并对局部环境变化较敏感。在南水北调中线干渠调查显示附着藻分布具有显著时空差异,并与营养盐、水温光照及水动力条件等共同相关[3]。Sánchez *et al.* [4]在浅水湖比较清水与浑水情景下浮游植物与附着藻初级生产,认为光环境差异会改变两类群落对总初级生产的贡献格局。富营养化及藻华过程也会通过透明度下降等途径间接影响附着藻生物量[5]。在河流、调水渠道等系统中, pH、流速、TN、TP 等是驱动附着藻群落变化的关键因子,且主导因子随区域与季节发生变化[6][7]。

调水与人工输水系统受人调控显著,水动力与水源结构变化会改变附着藻生境与群落过程。陈筱诺[8]以南水北调中线干渠(河南段)为对象,监测渠壁与人工基质附着藻并进行 RDA 分析,识别流速、温度、营养盐、电导率等为主要影响因子。多水源调蓄水库研究强调识别混合背景下水质风险与关键影响因素,并形成控制技术;区域生态调水研究从原型调水试验观测与数值模拟角度讨论引配水对水动力与水环境改善的响应关系[9]。然而,野外条件下混水比例常与温度、光环境及水动力等因素同步变化,仅依靠原位调查难以单独识别混水比例的影响,因此仍需室内控制实验进一步验证。

基于此,本研究以南水北调中线天津段重要调蓄水库——尔王庄水库为研究对象,设置 5 种引滦水和引江水混合比例与 2 个水深梯度,开展室内模拟混水试验,分析附着藻群落结构、生物量及多样性变化,结合环境因子揭示群落演替驱动机制,为多水源调蓄水库附着藻管控与水质生态调控提供理论依据。

2. 试验材料与方法

2.1. 水源及采样点

尔王庄水库是南水北调工程中线天津段重要调蓄水库(东经 117°25'55.2",北纬 39°32'27.6"),面积 11.03 km²,总库容 4530 万 m³,有效库容 3868 万 m³[10]。该水库主要承担城市生活供水、生态调蓄及引调水过渡调节等功能。自 2016 年 7 月南水北调工程中线引滦入津,水库开始了双水源共注入运行模式,其中,引滦水取自水库进水明渠,引江水取自水库进水口。

2.2. 室内模拟混水试验设计

本试验装置基于[11]实用新型专利设计,在尔王庄水库使用 25 L 的蒸馏水桶在水表面以下 0.5 m 处分别灌取尔王庄水库进水明渠的引滦水,和来源于尔王庄水库内进水口引江水。如图 1,定制一组规格相同(外直径 200 mm,壁厚 5 mm,长度 1.5 m)的亚克力封端管,5 个,并设计制作一个固定镀锌方管架子,用于垂直固定所有实验水柱。试验初始附着藻均采自尔王庄水库水体,通过刮取水下基质表面附着藻获得自然混合藻种。采集后的藻液采用过滤后的原位水体进行室内培养,待群落结构稳定后混匀作为统一初始藻源。所有附着基质均经纯水浸泡与清洗处理,并置于同一藻液中同步挂膜,以保证各处理组初始附着藻群落组成与丰度基本一致。室内模拟混水系统按引滦水:引江水体积比分别设置 A1 (1:0)、A2 (0:1)、A3 (1:2)、A4 (2:1)和 A5 (1:1) 5 个处理组。试验采用全光谱植物补光灯(欧普 MX650, 400~700 nm)模拟自然光环境,根据水下光照衰减规律统一布设光源,并设置 12 h:12 h 光暗循环。采用泰仕数字照度计 TES-1330a 测定光照强度,水体表面及水面下 10 cm 处照度分别约为 30,000 Lux 和 13,000 Lux。

使用 45 cm 宽,0.8 cm 网目的尼龙网袋,打结分层,每层内置边长约 2 cm 的立方体大理石挂块 2 块,共设 2 个深度层次(水面下 10 cm、60 cm)。将制备好的挂块串垂直放置于室内模拟水柱中。每个模拟水柱内平行放置 10 串挂块,在水柱上端口使用挂钩固定,以确保其位置稳定且均匀分布。在 7.10、7.17、7.24、7.31、8.7、8.14、8.21 七个时期对附着藻进行采集,每次采采用软毛刷刷下大理石块上的附着物,

并用生理盐水冲洗毛刷 3 次, 立即向水样中加入占水体的 1.5% 的鲁格氏液固定装入棕色瓶中, 备注好标签, 用于观察、鉴定与计数。



Figure 1. Indoor water column simulation device
图 1. 室内水柱模拟装置

2.3. 水环境因子测定

使用多参数水质分析仪(YSD)测定 pH 等理化指标, 使用 5 L 北原式采水器在水面下 0.5 m 处采集水样, 在实验室后立即测定总氮(TN, mg/L)、总磷(TP, mg/L)、氨氮(NH_4^+ -N, mg/L)、亚硝酸盐氮(NO_2^- -N, mg/L)、正磷酸盐(PO_4^{3-} -P, mg/L)等指标。每项指标测定三次, 取平均值作为最终结果, 具体分析方法参照《水和废水监测分析方法》。

2.4. 数据处理

本研究中附着藻单位面积细胞丰度计算, 如下:

$$N = \frac{\left(\frac{C_s}{F_s \times F_n} \times \frac{V}{v} \times P_n \right)}{S}$$

式中, N 为附着藻单位面积细胞丰度($\text{cells} \cdot \text{cm}^{-2}$), C_s 为计数框面积(mm^2), F_s 为每个视野的面积(mm^2), F_n 为计数过的视野数, V 为 1 L 水样经沉淀浓缩后的体积(mL), v 为计数框的体积(0.1 mL), P_n 为计数出的附着藻个数, S 为附着基质表面积(cm^2)。

计算 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)、Margalef 丰富度指数(D)分析藻类建群的多样性变化, 以优势度指数($Y \geq 0.02$) 判定优势种。使用 Microsoft Office Excel 和 Origin 2024 对环境因子及附着藻定量数据统计分析。选择 SPSS 的配对 t 检验、Mann-Whitney U 检验和 Kruskal-Wallis H 检验分析对附着藻生长与环境因子进行差异性分析($P < 0.05$)。用 SPSS26.0 对附着藻与环境因子进行 spearman 相关性关系进行分析($P < 0.05$)。采用 Canoco 5.0 软件对附着藻丰度与环境因子进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。

3. 结果与分析

3.1. 水环境因子的变化分析

采用 Friedman 非参数检验分析不同混水比例与时间对水体理化因子的影响。不同混水比例下水体环

境因子存在一定差异(表 1)。NH₄⁺-N 在 A1 组最高(0.251 ± 0.043 mg/L)，A2 组最低(0.145 ± 0.021 mg/L)。TN 在 A2 组达到最大值(1.015 ± 0.208 mg/L)，A5 组最低(0.671 ± 0.096 mg/L)。pH 整体处于弱碱性范围(7.995~8.273)。NO₂⁻-N 与 PO₄³⁻-P 整体维持较低水平。统计检验结果表明，不同混水比例对 pH 和 PO₄³⁻-P 存在显著差异($P < 0.05$)。

Table 1. Analysis table of mean and standard error of environmental factors with different mixing ratios
表 1. 不同混水比例环境因子均值及标准误分析表

混水比例	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	TN (mg/L)	pH
A1	0.251 ± 0.043	0.021 ± 0.012	0.014 ± 0.003	0.812 ± 0.179	8.273 ± 0.210
A2	0.145 ± 0.021	0.039 ± 0.013	0.012 ± 0.002	1.015 ± 0.208	8.168 ± 0.189
A3	0.229 ± 0.036	0.029 ± 0.012	0.010 ± 0.001	0.961 ± 0.117	8.110 ± 0.171
A4	0.208 ± 0.018	0.026 ± 0.010	0.011 ± 0.002	0.746 ± 0.100	8.010 ± 0.215
A5	0.198 ± 0.031	0.028 ± 0.010	0.011 ± 0.002	0.671 ± 0.096	7.995 ± 0.179

注：数据以均值 ± 标准误(Mean ± SE)表示，n = 8。

随时间变化，各环境因子呈现明显动态变化特征(表 2)。NH₄⁺-N 浓度由 7 月 3 日的 0.356 ± 0.042 mg/L 下降至 8 月 21 日的 0.138 ± 0.014 mg/L。TN 在 7 月 17 日达到最高值(1.502 ± 0.194 mg/L)，随后下降至 8 月 21 日的 0.276 ± 0.070 mg/L。pH 由 7 月 3 日的 7.256 ± 0.068 上升至 8 月 7 日的 8.804 ± 0.071。PO₄³⁻-P 在 7 月上旬相对较高，随后整体下降并维持较低水平。NO₂⁻-N 整体维持在 0.010~0.016 mg/L 之间。统计结果显示，NH₄⁺-N、TN、PO₄³⁻-P 及 pH 在时间尺度上均存在显著差异($P < 0.05$)。

Table 2. Analysis table of mean and standard error of environmental factors over time
表 2. 随时间推移环境因子均值及标准误分析表

时间	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)	TN (mg/L)	pH
7 月 3 日	0.356 ± 0.042	0.070 ± 0.015	0.010 ± 0.000	0.966 ± 0.213	7.256 ± 0.068
7 月 10 日	0.258 ± 0.034	0.078 ± 0.002	0.012 ± 0.002	0.890 ± 0.088	7.544 ± 0.085
7 月 17 日	0.218 ± 0.032	0.008 ± 0.004	0.016 ± 0.003	1.502 ± 0.194	7.816 ± 0.070
7 月 24 日	0.178 ± 0.034	0.002 ± 0.001	0.012 ± 0.002	0.898 ± 0.057	8.068 ± 0.063
7 月 31 日	0.168 ± 0.022	0.018 ± 0.004	0.014 ± 0.002	0.848 ± 0.038	8.564 ± 0.048
8 月 7 日	0.132 ± 0.013	0.014 ± 0.003	0.010 ± 0.000	0.552 ± 0.096	8.804 ± 0.071
8 月 14 日	0.200 ± 0.028	0.014 ± 0.005	0.012 ± 0.002	0.798 ± 0.106	8.352 ± 0.062
8 月 21 日	0.138 ± 0.014	0.022 ± 0.004	0.010 ± 0.002	0.276 ± 0.070	8.484 ± 0.080

注：数据以均值±标准误(Mean ± SE)表示，n = 5。

如图 2，整体来看，各环境因子在试验期间均表现出一定的阶段性变化特征。其中，NH₄⁺-N 与 PO₄³⁻-P 总体呈下降趋势，TN 在试验中期出现阶段性升高后逐渐降低，pH 整体呈升高趋势，而 NO₂⁻-N 始终维持较低水平。不同混水比例间环境因子变化趋势总体一致，部分指标在波动幅度上存在差异。

3.2. 附着藻群落结构组成分析

对试验期间附着藻样品观察鉴定，共鉴定出附着藻类 66 种，隶属于 4 门 29 科 42 属。其中 A1 组鉴定出 42 种；A2 组鉴定出 57 种；A3、A4、A5 组均为 55 种。绿藻门所占种类数最多，达 45.45%，其次为蓝藻门和硅藻门(图 3)。

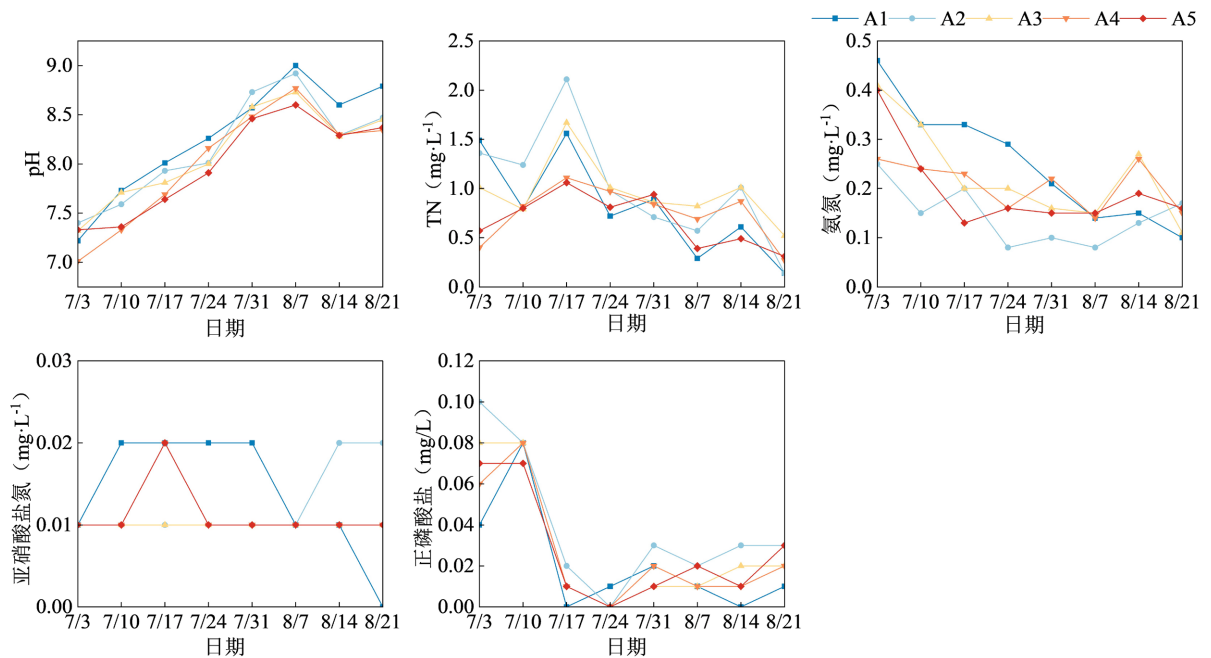


Figure 2. Agram of the variation trend of environmental factors in indoor simulated turbid water bodies
图 2. 室内模拟混水水体环境因子变化趋势图

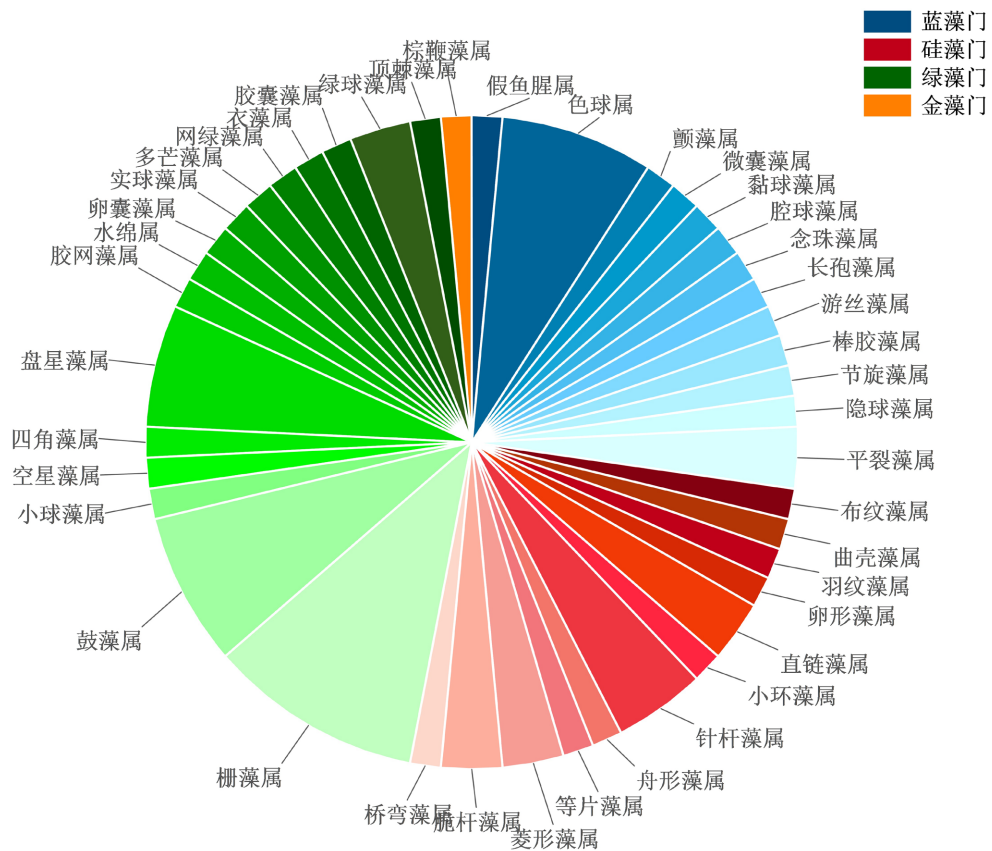


Figure 3. Species composition of attached algae to the water mixing ratio in indoor
图 3. 室内混水比例附着藻的种属组成

试验期间共鉴定出优势种 15 种, 隶属于蓝藻门、硅藻门和绿藻门, 见表 3。蓝藻门优势种种数最多, 7 种; 硅藻门和绿藻门分别有 4 种。蓝藻门的湖生假鱼腥藻、长孢藻、游丝藻和绿藻门的小球藻均在试验全周期作为优势种出现。试验周期内, 蓝藻门优势度中后期逐渐升高, 而硅藻门优势种主要集中于前期。

Table 3. Dominance index of attached algae in Erwangzhuang
表 3. 室内模拟混水附着藻优势度指数

门	优势种	日期						
		7.10	7.17	7.24	7.31	8.7	8.14	8.21
蓝藻门	湖生假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena mucicola</i>	0.06	0.12	0.11	0.06	0.06	0.11	0.09
	湖沼色球藻 <i>Chroococcus limneticus</i>		0.03	0.03	0.05	0.17	0.12	0.1
	易变色球藻 <i>Chroococcus varius</i>			0.03		0.02	0.05	0.03
	膨胀色球藻 <i>Chroococcus turgidus</i>					0.07		
	长孢藻 <i>Dolichospermum</i> sp.	0.03	0.04	0.08	0.04	0.05	0.12	0.14
	游丝藻 <i>Planctonema</i> sp.	0.06	0.04	0.12	0.19	0.27	0.25	0.19
	美丽隐球藻 <i>Aphanocapsa pulchra</i>			0.04	0.03	0.04	0.1	0.06
	羽纹藻 <i>Pinnularia</i> sp.	0.02	0.03					
硅藻门	肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	0.04	0.07	0.07	0.02			
	尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	0.04	0.05					
	隐头舟形藻 <i>Navicula cryptocephala</i>	0.03	0.03					
	弯曲栅藻 <i>Scenedesmus arcuatus</i>				0.03	0.03	0.03	0.02
绿藻门	小球藻 <i>Chlorella</i> sp.	0.13	0.12	0.1	0.11	0.07	0.06	0.07
	锥形胶囊藻 <i>Gloeocystis planctonica</i>	0.08	0.02	0.04	0.04	0.03		
	土生绿球藻 <i>Chlorococcum humicola</i>		0.04					

注: 此处优势种均选择优势度 $Y \geq 0.02$ 。

3.3. 混水比例对附着藻生物量及群落组成的影响

在室内混水试验中, 附着藻总生物量在时间上呈现先波动、后升高的趋势, 并在 8 月中旬达到峰值, 随后回落, 如图 4。生物量最高值出现在 8 月 14 日 A4 (0.6456 mg/L), 最低值出现在 8 月 21 日 A1 (0.0301 mg/L)。不同混水比例下, 附着藻平均总生物量存在一定差异, 其中 A2 组最高 (0.2580 ± 0.0444 mg/L)。整体来看, 各处理间生物量差异主要来源于硅藻门贡献的变化。

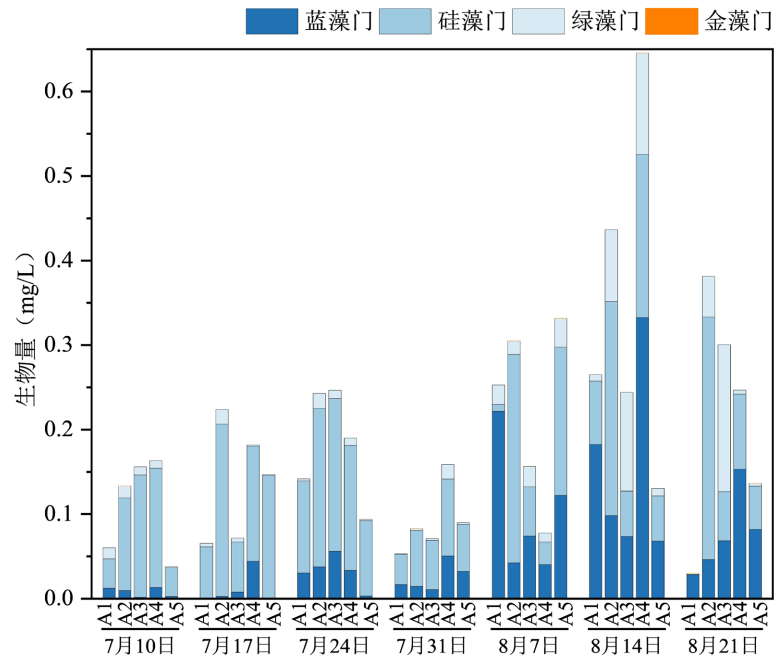


Figure 4. Average biomass variation pattern of indoor simulated mixed water attached algae
图 4. 室内模拟混水附着藻平均生物量变化规律图

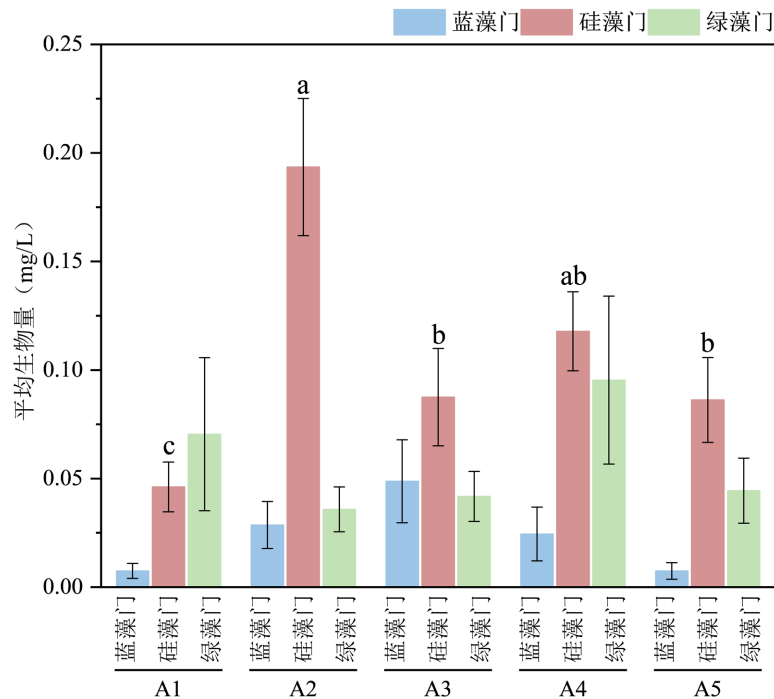


Figure 5. Variation patterns of algae biomass under different mixing ratios
图 5. 不同混水比例下各门藻类生物量变化规律图

从群落组成来看, 图 5, 附着藻以硅藻门、蓝藻门和绿藻门为主要组成类群, 其中硅藻门在试验前期占据优势, 对总生物量形成主要支撑; 试验中后期蓝藻门与绿藻门相对丰度有所提升, 但整体贡献仍低于硅藻门。金藻门仅零星出现, 对生物量贡献较小。对硅藻门生物量影响进行差异性分析, 达到显著水

平($P < 0.001$)。不同混合比例水体的硅藻门生物量均值分别为: A1 (0.0418 ± 0.0115) mg/L; A2 (0.1935 ± 0.0316) mg/L; A3 (0.0875 ± 0.0224) mg/L; A4 (0.1179 ± 0.0182) mg/L; A5 (0.0862 ± 0.0196) mg/L。其中, A2 处理显著高于 A3、A5 和 A1 ($P < 0.01$)。蓝藻门与绿藻门在不同混水比例间差异均未达到显著水平。因此, 在本试验下, 混水比例主要影响硅藻门生物量, 硅藻门是驱动附着藻群落结构差异的关键类群。

3.4. 混水比例对附着藻多样性指数的影响

不同混水比例对不同水层的附着藻群落多样性指数分析结果(图 6)。在 10 cm 水层, Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数在不同混水比例间均表现出显著差异($P < 0.01$), 其中 A3 与 A5 的多样性指数较高, 而 A1 的相对较低, 表明混水比例显著影响表层附着藻群落的物种丰富度及综合多样性水平。然而, Pielou 均匀度指数在不同混水比例间差异不显著, 说明混水比例对群落物种分布均匀性影响较小。

在 60 cm 水层, Margalef 丰富度指数仍表现出显著差异($P < 0.01$), 但 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数无显著变化。与表层相比, 深层群落对混水比例的响应强度有所减弱, 混水比例主要影响物种数量水平, 而对群落结构复杂度及均匀性调控作用不明显。混水比例对附着藻群落多样性的调控主要体现在物种丰富度层面, 且该效应在表层更为显著, 而深层群落结构相对稳定。

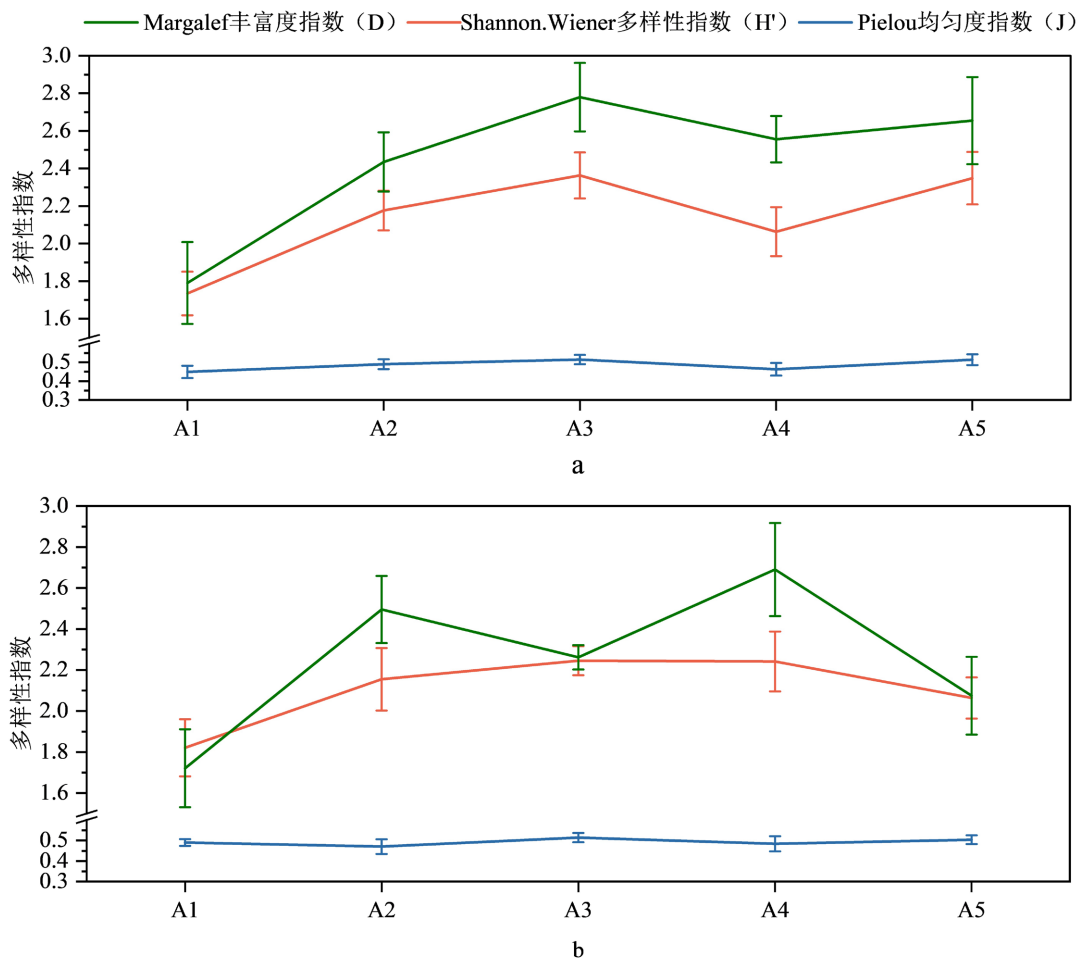


Figure 6. Variation of diversity index of attached algae in indoor simulated water
图 6. 室内模拟混水附着藻多样性指数变化规律

3.5. 附着藻群落结构与环境因子 Spearman 相关性分析

为揭示附着藻群落结构与环境因子的耦合关系,对 10 cm 和 60 cm 水层的各藻门细胞丰度及多样性指数与理化因子进行 Spearman 相关分析(图 7)。

在 10 cm 水层,蓝藻门与 Shannon-Wiener 多样性指数、均匀度指数及 TN 均呈极显著负相关($P < 0.01$),同时与 pH 呈极显著正相关($P < 0.01$),说明蓝藻门生物量增加时群落多样性和均匀度降低,而较高的 pH 条件可能有利于蓝藻生长。硅藻门与 Shannon-Wiener 多样性指数及 Pielou 均匀度指数呈显著正相关($P < 0.05$),表明在 10 cm 水层中,硅藻门丰度升高通常伴随群落多样性与均匀度的提高,群落结构趋于更为复杂且分布更均衡。PH 与 S-W 多样性指数及均匀度指数呈显著负相关($P < 0.05$)。均匀度指数与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 均呈显著正相关($P < 0.05$),表明氮营养盐水平的增加可能有利于群落物种分布趋于均衡。

60 cm 水层,蓝藻门仍与均匀度指数呈极显著负相关($P < 0.001$),显示优势种增强对群落均衡性的抑制作用在不同水层均存在。硅藻门与丰富度指数呈极显著正相关($P < 0.001$),表明硅藻门在群落物种数量增加过程中具有较为重要的贡献。Shannon-Wiener 多样性指数与 pH 呈极显著负相关($P < 0.01$),与 TN 呈显著正相关($P < 0.001$);同时均匀度指数与 pH 呈显著负相关($P < 0.001$),而与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TN 均呈显著正相关($P < 0.01$)。这些结果表明,在 60 cm 水层中,pH 变化与群落多样性及均匀度变化存在负相关关系,而氮营养盐变化与群落结构变化之间存在一定关联。

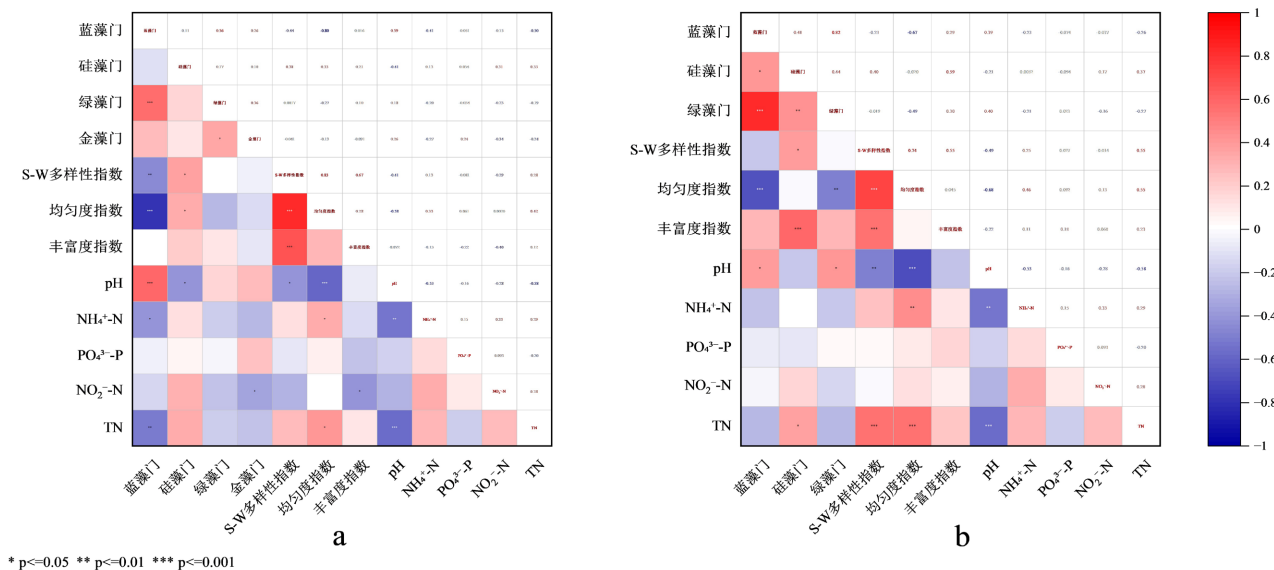


Figure 7. Spearman correlation coefficients between attached algae cell abundance, diversity index, and environmental factors in simulated indoor water layers of 10 cm (a) and 60 cm (b) depth

图 7. 室内模拟混水 10 cm 水层 (a) 与 60 cm 水层 (b) 附着藻细胞丰度、多样性指数与环境因子的 spearman 相关系数

3.6. 附着藻群落结构与环境因子的冗余分析

为分析环境因子对附着藻群落结构的影响,对附着藻各藻门细胞丰度与水环境因子进行冗余分析(RDA)。结果表明,如图 8,RDA 轴 1 和轴 2 的解释率分别为 16.41%和 0.12%,共解释了附着藻细胞丰度变化的 16.53%。整体解释率偏低,说明本研究所测定的环境因子仅能解释小部分附着藻群落结构的变异,群落大部分变异尚未得到解释。其中,pH 是解释群落结构变异最重要的因子,单因子贡献率为 77.1%,差异检验达到显著水平($P < 0.01$)。蓝藻门、绿藻门与金藻门均与 pH 呈正相关关系,表明在本试验中这

三类藻门的细胞丰度与较高的 pH 环境存在正向关系。硅藻门与 pH 呈负相关，指示硅藻门细胞丰度在较低 pH 背景下相对更高。但 TN 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和硅藻门呈正相关关系，表明氮营养盐变化与硅藻门丰度变化之间存在一定的关联。

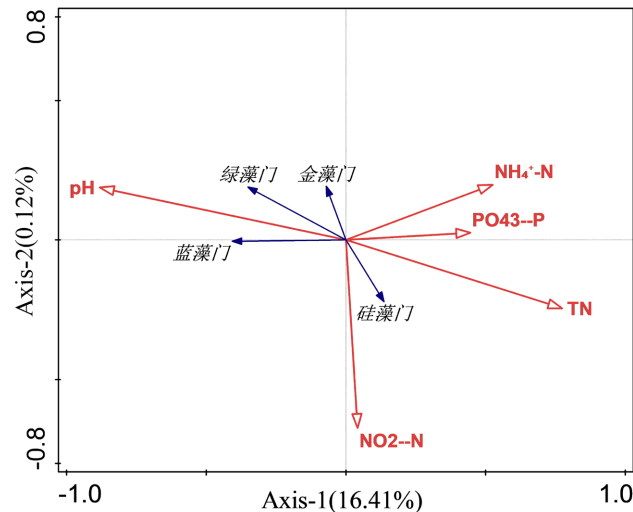


Figure 8. Redundancy analysis of attached algae cell abundance in simulated mixed water under indoor conditions versus environmental factors

图 8. 室内模拟混水附着藻细胞丰度与环境因子的冗余分析

4. 讨论

本试验于 7 月 10 日~8 月 21 日开展，设置 2 个深度(水面下 10 cm 和 60 cm)与 5 个混水比例处理组 (A1~A5)，每 7 天间隔连续采集附着藻样品。试验期间共鉴定出附着藻 4 门 29 科 42 属 66 种，说明在室内模拟水柱条件下，附着藻能够在较短时间内形成较为丰富的物种组成。从藻门构成看，绿藻门种类数占比最高(45.45%)，其次为蓝藻门(27.27%)和硅藻门(25.76%)，金藻门仅检出 1 种(0.015%)。不同混水比例处理下物种数存在一定差异，A2 的物种数最多(57 种)，而 A1 仅记录 42 种，表明水体组成变化对附着藻群落结构具有一定影响。已有研究表明，营养盐结构、水化学条件及水动力变化均会影响附着藻群落结构与物种组成。广州城市河流附着藻群落恢复研究发现，总氮、总磷、溶解氧、水深及流速等环境因子均能够影响附着藻群落结构[12]。信江流域研究也表明，总磷、pH 及流速是驱动附着藻群落变化的重要因素[13]。因此，本研究中不同混水比例处理下附着藻物种数的差异，可能与混水后水体营养盐结构及水化学条件的变化有关。

在群落优势种中，蓝藻门优势种种类数最多，湖生假鱼腥藻、长孢藻、游丝藻和绿藻门的小球藻在研究全周期持续作为优势种出现。其中，湖生假鱼腥藻在试验初期即表现出较高优势度，说明其具有较强的早期定殖能力；游丝藻在 7 月下旬至 8 月上旬优势度明显升高，表现出中后期增强趋势；长孢藻则在试验后期逐渐增加。在南水北调模拟渠道研究表明，在相对稳定或低水动力条件下，丝状藻类更容易积累并形成优势[14]。上海景观湖附着藻建群研究也发现，群落建群初期通常以硅藻为主，随后绿藻和丝状藻逐渐增加并参与群落结构构建[15]。本研究中蓝藻门优势种持续存在，可能与室内水柱条件下较稳定的水动力环境有关。

本试验中，附着藻总生物量随时间呈先波动后升高的变化趋势，并于 8 月中上旬达到峰值。从不同藻门生物量贡献度来看，试验前期(7 月 10 日~7 月 24 日)总生物量主要由硅藻门支撑；进入 8 月(8 月 7

日~8月14日)蓝藻门和绿藻门在部分处理组出现明显抬升,与硅藻门共同推动总生物量升高。混水比例对藻门生物量的作用呈现差异性,硅藻门对混水比例变化响应最敏感($P < 0.001$),A2(0:1)硅藻门生物量显著高于A1、A3、A5,表明在室内水柱条件下,混水比例可以通过影响硅藻门的积累能力来改变群落结构的生物量,硅藻门是驱动不同处理组差异的关键类群。结合环境因子, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在7月中旬迅速降至接近检出限并长期维持低值、pH持续升高。可能是由于附着藻对磷的吸收快,在短期内降低了水体中可利用磷水平,并可能通过生物膜代谢活动改变局部微环境,进而与群落中后期结构变化存在一定关联。研究表明,氮、磷营养盐是附着藻生长的重要物质基础,藻类生长过程中会持续消耗水体中的营养盐[16]。在模拟流水研究发现,周丛硅藻在磷限制条件下对磷供给变化具有明显响应[17]。长江流域湖泊入湖河流研究也表明,硅藻对营养盐及理化条件变化具有较高敏感性[18]。因此,在本研究中硅藻门可能是驱动不同混水比例间附着藻群落差异的关键类群。

pH在试验期间呈明显上升趋势,并在8月初达到较高水平。Spearman相关分析显示,两水层中pH与Shannon-Wiener指数及Pielou均匀度指数均为显著负相关($P < 0.05$),水体pH升高伴随群落多样性与均匀度下降。这种变化可能与附着藻光合作用有关。已有研究指出,附着藻光合作用过程中会持续消耗 CO_2 ,从而改变碳酸盐平衡并导致pH升高[19]。RDA分析进一步显示,蓝藻门与pH均呈极显著正相关($P < 0.01$),附着藻通过光合作用可造成明显的昼夜pH波动,光照期因 CO_2 被消耗而推动pH升高,说明藻类增多同时pH升高[20],同时,较高pH会改变无机碳形态并提高对 HCO_3^- 获取能力的依赖,而蓝藻通常具有较强的无机碳获取能力,因此偏碱环境可能反过来提高其竞争优势[21]。因此,本研究中pH与蓝藻门的正相关更可能反映的双向反馈,而非单向因果驱动关系。

不同水层间亦存在一定差异。10 cm水层中蓝藻门与多样性指数和均匀度指数呈显著负相关,说明浅层环境下蓝藻门更易形成优势,对群落结构具有较强影响;而60 cm水层硅藻门与丰富度指数呈显著正相关,表明较深水层群落组成相对多样,群落结构更多受营养盐条件调控。因此,表层附着藻群落更易受优势类群影响,而深层群落结构对营养盐变化的响应更为明显。

本研究采用室内静态模拟水柱系统开展试验,能够较好控制混水比例及水化学条件,但与真实水库环境仍存在差异。实际水库中水动力、风浪扰动及环境因子变化更为复杂,可能影响附着藻的定殖与群落演替过程。此外,本研究周期较短,主要反映附着藻群落的阶段性变化,对长期演替规律仍需进一步研究。后续可结合原位监测与动态模拟试验开展深入分析。

5. 结论

在调查期间,对5种混水比例水体的附着藻样本进行分析。结果表明:

(1) 室内模拟混合水体中的附着藻能够在人工基质表面快速定殖并形成较稳定群落。本研究共鉴定附着藻66种,隶属于4门29科42属,主要包括蓝藻门、硅藻门、绿藻门及少量金藻门,表明其群落组成较为丰富且结构稳定。

(2) 室内混水试验下附着藻群落结构具有明显的时间演替特征,蓝藻门在群落中占优势,而硅藻门在早期阶段对群落形成具有重要贡献。室内附着藻总生物量表现为先波动、后升高、再回落的变化趋势,峰值出现在8月中旬,说明在室内模拟混水中附着藻群落同样经历了由定殖到扩张再到结构调整的演替过程。

(3) 混水比例对不同藻门的影响存在明显差异。硅藻门生物量受混水比例影响极显著($P < 0.001$),A2组显著高于A1、A3和A5,说明A2-纯引江水更有利于硅藻积累,在室内模拟混水系统中真正驱动不同处理组群落差异的关键类群是硅藻门。

(4) 混水比例对附着藻多样性的影响主要体现在物种丰富度层面,且表层水层对比例变化更敏感。在

10 cm 水层, 不同混水比例对 Shannon-Wiener 指数和 Margalef 指数均具有显著影响($P < 0.01$); 在 60 cm 水层, 仅 Margalef 丰富度指数表现出显著差异($P < 0.01$), 表明表层附着藻群落对混水比例变化更敏感, 而深层群落结构相对稳定。

(5) 本研究所测定的环境因子仅能解释小部分附着藻群落结构的变异, 群落大部分变异尚未得到解释。其中, pH 是解释群落结构变异最重要的因子。Spearman 相关分析与 RDA 分析均表明, pH 与群落多样性及均匀度呈负相关, 而蓝藻门与 pH 呈显著正相关, 说明偏碱环境可能有利于蓝藻类群生长。试验期间 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 持续下降, 表明附着藻生长过程中对磷具有较强消耗作用, 营养盐变化与群落演替过程密切相关。

基金项目

天津市科学技术委员会生态环境治理科技重大专项, 18ZXSZSF00080。

参考文献

- [1] 郭雁辉, 刘飞, 甄品娜, 等. 邯郸东部平原多水源氢氧同位素时空变化特征[J]. 地球与环境, 2025, 53(1): 112-122.
- [2] 刘健. 山东省多水源调蓄水库水质风险控制技术研究[M]. 济南: 山东省水利科学研究院, 2020.
- [3] 彭玉和刘辉. 南水北调中线总干渠着生藻时空分布特征及其对水质指示作用评价[C]中国水利学会. 中国水利学会 2019 学术年会论文集第四分册. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 394-399.
- [4] Sánchez, M.L., Rodríguez, P., Torremorell, A.M., Izaguirre, I. and Pizarro, H. (2016) Phytoplankton and Periphyton Primary Production in Clear and Turbid Shallow Lakes: Influence of the Light Environment on the Interactions between These Communities. *Wetlands*, 37, 67-77. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0840-x>
- [5] 夏曼莉, 于谨磊, 何虎, 等. 太湖蓝藻碎屑对水质及附着藻和水丝蚓生物量的影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 1050-1059.
- [6] 师艳丽, 闫祯, 张依章, 等. 黄河中游典型丘陵沟壑区着生藻类群落特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2025, 45(22): 11078-11091.
- [7] 冯学凯. 云南红河流域着生藻群落特征及其对环境因子的响应[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2024.
- [8] 陈筱诺. 南水北调中线干渠(河南段)着生藻群落结构变化及驱动因子研究[D]: [硕士学位论文]. 南阳: 南阳师范学院, 2022.
- [9] 潘宁霞. 基于多水源条件下区域生态调水机制研究[M]. 宁波: 宁波市海曙区农业农村局, 2019.
- [10] 翟鑫, 贾海涛, 黄茜. 天津流域跨省区调水实践与启示[J]. 人民黄河, 2024, 46(S2): 66-68.
- [11] 乔之怡, 等. 水体附着藻建群实验装置[P]. 中国专利, CN202122358877.6. 2022-08-12.
- [12] 莫露清, 杨扬, 邵义萍, 等. 城市河流近自然修复过程中附着藻类群落恢复与环境驱动机制[J]. 湖泊科学, 2025, 37(6): 1926-1937.
- [13] 汪莉娜, 李林, 周佳华, 等. 信江丰水期着生藻类群落结构空间分布特征及影响因子分析[J]. 环境污染与防治, 2025, 47(12): 98-105.
- [14] Sun, L., Wu, L., Liu, X., Huang, W., Zhu, D., Wang, Z., et al. (2023) Reducing the Risk of Benthic Algae Outbreaks by Regulating the Flow Velocity in a Simulated South-North Water Diversion Open Channel. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20, Article 3564. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043564>
- [15] 陈姗, 柳昭莹, 张玮, 等. 上海某河口型景观湖冬季附着藻类的建群过程初探[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(3): 345-351.
- [16] Koch, A., Lau, D.C.P., Gönczi, M., Weslien, K. and Corcoll, N. (2026) Periphyton as an Integrative Indicator of Pesticide Bioaccumulation, Nutrient Pollution and Fatty Acid Alterations in Agricultural Streams. *FEMS Microbiology Ecology*, 102, fiag016. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiag016>
- [17] Bothwell, M.L. (1989) Phosphorus-Limited Growth Dynamics of Lotic Periphytic Diatom Communities: Areal Biomass and Cellular Growth Rate Responses. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46, 1293-1301. <https://doi.org/10.1139/f89-166>
- [18] Hu, Y., Zhang, J., Huang, J. and Hu, S. (2022) Environmental Drivers and Aquatic Ecosystem Assessment of Periphytic

Algae at Inflow Rivers in Six Lakes over the Yangtze River Basin. *Water*, **14**, Article 2184.

<https://doi.org/10.3390/w14142184>

- [19] 陈亚强, 陈慧黠, 黄胜男, 等. 朱隈子水库及上游河流浮游植物功能群特征与环境因子的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2025, 40(5): 854-863.
- [20] Nimick, D.A., Gammons, C.H., Cleasby, T.E., Madison, J.P., Skaar, D. and Brick, C.M. (2003) Diel Cycles in Dissolved Metal Concentrations in Streams: Occurrence and Possible Causes. *Water Resources Research*, **39**, Article 1247. <https://doi.org/10.1029/2002wr001571>
- [21] Mangan, N.M., Flamholz, A., Hood, R.D., Milo, R. and Savage, D.F. (2016) Ph Determines the Energetic Efficiency of the Cyanobacterial CO₂ Concentrating Mechanism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**, E5354-E5362. <https://doi.org/10.1073/pnas.1525145113>