

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2026.02.002

编者按:

浮游植物作为水生生态系统中的初级生产者,是评价水体生态系统健康的重要生物学指标。近年来,利用水生生物群落特征诊断水体营养状态与污染程度受到广泛关注,该方法能够综合反映水环境的物理化学变化,具有敏感性和直观性优势。此文中,研究者以浮游植物群落结构为生物学指标,系统评估了运城市典型流域的浮游植物种类组成、密度、生物量及多样性特征,揭示了蓝藻在密度上占据绝对优势且多数样点处于中度污染状态的水生态风险,探讨了该区域面临的富营养化挑战与生态系统稳定性问题,并提出了“控源截污为基础、生态修复为核心、预警监测为保障”的综合治理策略,为运城市夏季丰水期水环境精准治理及黄河流域水生态保护提供了科学依据。

运城市典型流域浮游植物群落结构特征及生态治理策略研究

李文英¹,吴海滨^{1,2},张晓可³,徐晶晶⁴,杨轶婷⁴,李剑锋^{1,2*},程芳琴^{1,2*}

1. 山西大学 环境与资源学院,山西黄河实验室,山西太原 030006

2. 山西大学 资源与环境工程研究所,山西黄河实验室,山西太原 030006

3. 安庆师范大学 生命科学学院,安徽安庆 246011

4. 运城市生态环境局,山西运城 044000

摘要:为评估运城市典型流域水生态健康状况,本研究于2024年8月对运城市汾河、涑水河及伍姓湖5个代表性样点的浮游植物群落进行了系统调查。结果显示:5个调查样点共鉴定浮游植物6门49属73种,以硅藻门、绿藻门和蓝藻门为主;浮游植物平均密度为 1.8703×10^8 cells/L,蓝藻门占比达92.52%;平均生物量为21.38 mg/L,硅藻门贡献最大(75.16%)。浮游植物优势种主要为假鱼腥藻、细鞘丝藻等蓝藻,存在水体富营养化风险。多样性指数表明,水体整体处于中度污染水平。基于此,提出了“控源截污为基础、生态修复为核心、预警监测为保障”的综合治理对策,以期为运城市夏季丰水期水环境精准治理提供科学依据。

关键词:运城市;浮游植物;群落结构;多样性指数;治理对策

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2026)02-0122-09

Study on the structural characteristics of phytoplankton communities and ecological management strategies in typical river basins of Yuncheng City

LI Wenying¹, WU Haibin^{1,2}, ZHANG Xiaoke³, XU Jingjing⁴, YANG Yiting⁴,

LI Jianfeng^{1,2*}, CHENG Fangqin^{1,2*}

1. Shanxi Laboratory for Yellow River, College of Environmental & Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2. Shanxi Laboratory for Yellow River, Institute of Resources and Environmental Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

3. School of Life Sciences, Anqing Normal University, Anqing 246011, China

4. Yuncheng Ecological Environment Bureau, Yuncheng 044000, China

*通信作者

基金项目:黄河流域生态保护和高质量发展—运城市生态环境保护治理攻坚“一市一策”综合解决方案(2022-YRUC-01-050206-016)

收稿日期:2025-11-18;修回日期:2026-03-01

Abstract: To assess the health status of the aquatic ecosystem in typical river basins of Yuncheng City, a systematic investigation was conducted on the phytoplankton communities at five representative sampling sites in the Fenhe River, the Sushui River, and the Wuxing Lake in August 2024. The results showed that a total of 73 species were identified in five survey sites, belonging to 49 genera and 6 phyla, primarily dominated by *Bacillariophyta*, *Chlorophyta*, and *Cyanophyta*. The average phytoplankton density was 1.8703×10^8 cells/L, with *Cyanophyta* accounting for 92.52%. The average biomass was 21.38 mg/L, with *Bacillariophyta* contributing the most (75.16%). The dominant species were mainly cyanobacteria of *Pseudanabaena* and *Lepidolyngbya*, etc., which posed a risk of eutrophication. The diversity index indicated that the water body was moderately polluted. Based on this, the comprehensive management strategy of "controlling the source and intercepting pollution as the basis, ecological restoration as the core, and early warning and monitoring as the guarantee" was proposed, aiming to provide a scientific basis for the precise management of the water environment in Yuncheng City.

Keywords: Yuncheng City; phytoplankton; community structure; diversity index; management strategies

0 引言

运城市作为山西省的重要区域,其境内的汾河、涑水河及伍姓湖等水体在支撑工农业生产、保障居民生活及维持区域生态平衡等方面具有重要作用。然而,伴随区域经济快速发展和人类活动强度增大,工业废水、农业面源污染以及生活污水逐年增加,若管理不善,可能引发水体营养盐累积、生态结构趋于单一,甚至诱发藻类水华,从而对水生态系统的稳定性与水资源可持续利用形成潜在压力^[1-2]。

浮游植物作为水生生态系统中的初级生产者,其群落结构、数量变动和多样性特征是评价水体营养状态、污染程度和生态系统健康的重要生物学指标^[3-4]。它们对环境变化反应灵敏,其种群动态能直观地反映水体的物理、化学状况及其变化趋势。

目前,对运城市水系的系统性、多点位浮游植物生态学研究尚显不足。为此,本研究于2024年8月对运城市典型流域的5个样点进行了浮游植物群落专项调查,旨在:(1)全面掌握该区域浮游植物的种类组成、密度、生物量及多样性现状;(2)科学评估各水域的营养状态与生态健康水平;(3)针对诊断出的问题,提出切实可行的水环境治理与生态保护对策,为当地水资源管理和环境保护决策提供数据支撑与理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

运城市地处山西省西南部,位于晋、陕、豫三省交界的黄河金三角地区,其绝大部分区域属于黄河流域,是黄河中游生态屏障的重要组成部分。境内

水系主要由黄河一级支流汾河,以及流经运城盆地的涑水河等构成,伍姓湖则是该区域重要的天然湖泊湿地。本次调查所选取的汾河、涑水河及伍姓湖等典型水体,代表了运城市从主干河流、区域河流到浅水湖泊的不同水体类型,其生态状况能够全面、系统地反映运城市在自然条件与人为活动双重作用下的水生态健康状况,为本研究提供了至关重要的评估依据。

1.2 采样点分布

本次共设5个生态调查样点:柴村桥、庙前村、城子埭、张留庄和伍姓湖,涵盖河流与湖库两种水体类型,具有区域代表性。野外调查样点位置见图1所示。

1.3 调查方法

浮游植物采集包括定性和定量采集。浮游植物定性样品用25号浮游生物网在表层缓慢拖拽采集,网口与水面垂直,且网口上端不露出水面。定量采集时,取各层水样等量混匀后取水样1L。所采集样品用鲁哥试液固定保存,带回实验室进行鉴定。浮游植物鉴定方法包括形态学鉴定方法和分子系统学方法^[5]。浮游植物的鉴定及计数上以传统的形态学鉴定方法为主。浮游植物细胞生物量根据细胞几何形态和体积进行换算^[6]。

1.4 数据分析与处理方法

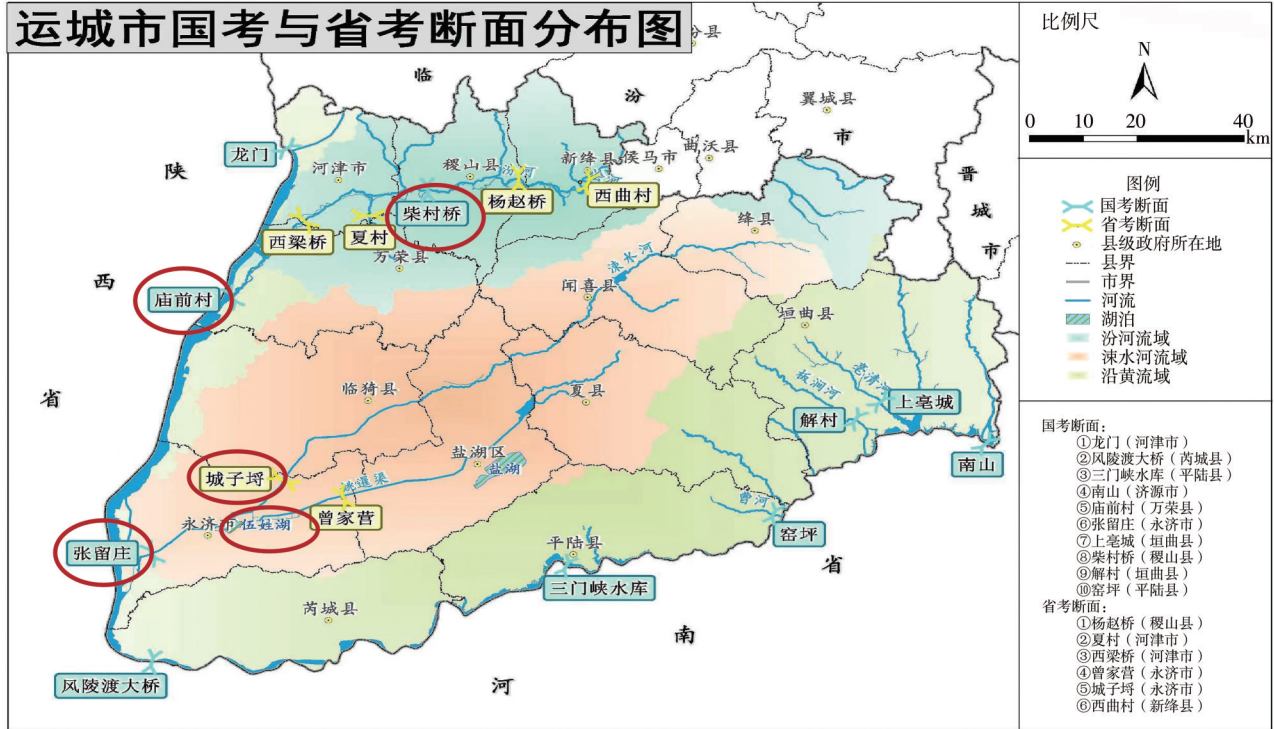
数据采用Excel 2020以及Origin 2021等软件处理。生物多样性指数采用下面相关公式计算:

$$(1) \text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H = - \sum_{i=1}^S (p_i)$$

$$\ln(p_i);$$

$$(2) \text{Pielou 均匀度指数, } E = H / \ln(S);$$

$$(3) \text{Margalef 丰富度指数, } D = (S-1) / \ln(N);$$



柴村桥：经度（110.888 0° ），纬度（35.576 0° ）（位于运城市河津市汾河干流）
 庙前村：经度（110.486 5° ），纬度（35.353 8° ）（位于运城市万荣县汾河入黄口附近）
 张留庄：经度（110.327 6° ），纬度（34.830 0° ）（位于运城市永济市涑水河段）
 城子埝：经度（110.592 5° ），纬度（34.985 0° ）（位于运城市盐湖区涑水河段）
 伍姓湖：经度（110.511 0° ），纬度（34.868 0° ）（位于运城市永济市）

图1 浮游植物调查样点分布示意图

Figure 1 Schematic diagram of phytoplankton sampling point distribution

(4) Simpson 优势度指数, $d = 1 - \sum_{i=1}^s (n_i/N)^2$.

式中: S—总种数; p_i — i 种类的个体数占总个体数的比例; N—所有种的个体总数。

2 运城市水生浮游植物调研结果

2.1 浮游植物种类

5 个调查样点共鉴定浮游植物 6 门 49 属 73 种 (表 1)。其中, 蓝藻门共 12 属 16 种, 占总种类数的 21.92%; 绿藻门共 16 属 22 种, 占总种类数的 30.14%; 硅藻门 16 属 27 种, 占总种类数的 36.99%; 甲藻门 1 属 1 种, 占总种类数的 1.37%; 隐藻门 3 属 4 种, 占总种类数的 5.48%; 裸藻门 1 属 3 种, 占总种类数的 4.11% (图 2)。图 3 显示了运城市调查水域所记录部分浮游植物的图片。

汾河 2 个样点共记录浮游植物 43 种 (表 1), 其中蓝藻门、绿藻门、硅藻门、隐藻门和裸藻门分别为 10、11、19、1 和 2 种, 分别占总种类数的 23.26%、25.58%、44.19%、2.33% 和 4.65%。汾河两个样点相比, 柴

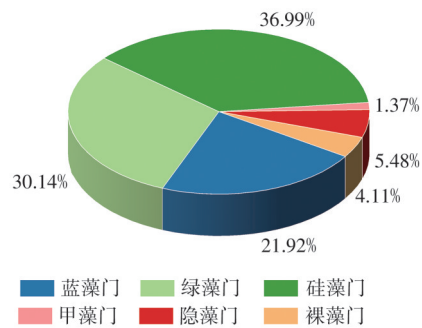


图2 运城市 5 个调查样点浮游植物各类群占比

Figure 2 Proportions of various phytoplankton groups at five survey sites in Yuncheng City

村桥样点种类数相对较多, 为 31 种; 庙前村桥样点种类数相对较少, 为 28 种。涑水河 2 个样点共记录浮游植物 44 种 (表 1), 其中蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、隐藻门和裸藻门分别为 6、15、19、1.2 和 1 种, 分别占总种类数的 13.64%、34.09%、43.18%、2.27%、4.55% 和 2.27%。涑水河 2 个样点相比, 城子埝样点相对较少, 为 17 种; 张留庄样点种类数相对较多, 为 37 种。伍姓湖样点共记录浮游植物

43种(表1),其中蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、占 总种类数的 32.56%、25.58%、25.58%、2.33%、
 隐藻门和裸藻门分别为 14、11、11、1、3 和 3 种,分别 6.98% 和 6.98%。

表1 运城市5个调查样点浮游植物种类名录
 Table 1 List of phytoplankton species at five survey sites in Yuncheng City

门类	种类	拉丁学名	调查样点					
			柴村桥	庙前村	城子埭	张留庄	伍姓湖	
蓝藻门	束丝藻	<i>Aphanizomenon</i> sp.	+				+	
	拟短形颤藻	<i>Oscillatoria subbrevis</i>	+	+		+	+	
	奥克尼颤藻	<i>Oscillatoria okni</i>	+		+	+		
	拉氏拟柱孢藻	<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>		+			+	
	假鱼腥藻	<i>Pseudoanabaena</i> sp.	+	+		+	+	
	钝顶节旋藻	<i>Arthrospira platensis</i>	+					
	细鞘丝藻	<i>Leptolyngbya</i> sp.	+	+	+	+	+	
	弯形小尖头藻	<i>Raphidiopsis curvata</i>	+	+		+	+	
	阿氏项圈藻	<i>Anabaenopsis arnoldii</i>					+	
	卷曲长孢藻	<i>Dolichospermum circinale</i>					+	
	浮游长孢藻	<i>Dolichospermum planctonicum</i>					+	
	挪氏微囊藻	<i>Microcystis novacekii</i>				+	+	
	惠氏微囊藻	<i>Microcystis wesenbergii</i>		+			+	
	细小隐球藻	<i>Aphanocapsa elachista</i>					+	
	细小平裂藻	<i>Merismopedia minima</i>					+	
	点形平裂藻	<i>Merismopedia punctata</i>	+				+	
	绿藻门	二形栅藻	<i>Scenedesmus dimorphus</i>				+	+
		四尾栅藻	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	+		+	+	+
光滑栅藻		<i>Scenedesmus ecornis</i>		+		+	+	
单角盘星藻		<i>Pediastrum simplex</i>		+		+		
二角盘星藻		<i>Pediastrum duplex</i>	+	+		+		
整齐盘星藻		<i>Pediastrum integrum</i>		+		+		
扭曲蹄形藻		<i>Kirchneriella contorta</i>				+	+	
螺旋纤维藻		<i>Ankistrodesmus spiralis</i>				+		
纺锤藻		<i>Elakatothrix</i> sp.				+		
集星藻		<i>Actinastrum</i> sp.	+					
椭圆小球藻		<i>Chlorella ellipsoidea</i>				+		
小形卵囊藻		<i>Oocystis parva</i>				+	+	
波吉卵囊藻		<i>Oocystis borgei</i>	+			+	+	
四刺顶棘藻		<i>Chodatella quadriseta</i>				+		
四足十字藻		<i>Crucigenia tetrapedia</i>					+	
微小四角藻		<i>Tetraedron minimum</i>					+	
膨胀四角藻		<i>Tetraedron tumidulum</i>					+	
短刺四星藻		<i>Tetrastrum staurogeniaeforme</i>				+		
硬弓形藻		<i>Schroederia robust</i>		+				
卵形衣藻		<i>Chlamydomonas ovalis</i>		+			+	
空星藻		<i>Coelastrum</i> sp.	+		+	+	+	
转板藻		<i>Mougeotia</i> sp.	+	+				
硅藻门		梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	+	+	+	+	+
	颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>	+	+				
	颗粒直链藻极狭变种	<i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	+	+	+		+	

续表1 运城市5个调查样点浮游植物种类名录

Continued Table 1 List of phytoplankton species at five survey sites in Yuncheng City

门类	种类	拉丁学名	调查样点				
			柴村桥	庙前村	城子埝	张留庄	伍姓湖
	光滑侧链藻	<i>Pleurosira laevis</i>			+		
	矮小沟链藻	<i>Aulacoseira pusilla</i>	+	+	+	+	+
	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	+	+		+	+
	肘状针杆藻缢缩变种	<i>Synedra ulna var. contracta</i>	+				
	钝脆杆藻	<i>Fragilaria capucina</i>		+			
	沃切里脆杆藻	<i>Fragilaria vaucheriae</i>				+	
	短线脆杆藻	<i>Fragilaria brevistriata</i>				+	+
	拟螺旋菱形藻	<i>Nitzschia sigmoidea</i>	+	+	+		+
	细菱形藻	<i>Nitzschia acicularis</i>	+	+	+	+	
	谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>	+	+		+	
	两栖菱形藻	<i>Nitzschia amphibia</i>			+		
	反曲菱形藻	<i>Nitzschia reversa</i>			+	+	
	双尖菱板藻	<i>Hantzschia amphioxys</i>		+			
	布雷羽纹藻	<i>Pinnularia brebissonii</i>	+	+	+		
	披针形舟形藻	<i>Navicula lanceolata</i>	+		+	+	+
	弯月形舟形藻	<i>Navicula menisculus</i>	+		+		+
	隐头舟形藻	<i>Navicula cryptocephala</i>	+				+
	具球异菱藻	<i>Anomoeoneis sphaerophora</i>					+
	长圆双壁藻	<i>Diploneis oblongella</i>	+				
	虱形双眉藻	<i>Amphora pediculus</i>				+	
	尖布纹藻	<i>Gyrosigma acuminatum</i>			+	+	+
	普通等片藻	<i>Diatoma vulgare</i>	+		+		
	粗壮双菱藻	<i>Surirella robusta</i>	+			+	
	卵形双菱藻	<i>Surirella ovata</i>		+			
甲藻门	加顿多甲藻	<i>Peridinium gatunense</i>				+	+
隐藻门	具尾逗隐藻	<i>Komma caudata</i>					+
	蓝隐藻	<i>Chroomonas</i> sp.					+
	马索隐藻	<i>Cryptomonas marssonii</i>				+	
	倒卵隐藻	<i>Cryptomonas obovata</i>		+		+	+
裸藻门	绿色裸藻	<i>Euglena viridis</i>	+	+		+	+
	鱼形裸藻	<i>Euglena pisciformis</i>					+
	带形裸藻	<i>Euglena ehrenbergii</i>		+			+

说明:表格中“+”表示对应的调查点存在此类浮游植物

2.2 浮游植物密度与生物量

本次调查运城市5个调查样点浮游植物平均密度为 1.8703×10^8 cells/L,其中蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、隐藻门和裸藻门浮游植物密度分别为 1.7304×10^8 、 4.55×10^6 、 8.54×10^6 、 1.4×10^5 、 6.8×10^5 和 0.8×10^5 cells/L,分别占总密度的92.52%、2.43%、4.56%、0.08%、0.36%和0.04%。5个样点之间浮游植物密度差异较大,其中伍姓湖样点密度最

大,为 7.7801×10^8 cells/L;其次是城子埝和柴村桥,分别为 5.727×10^7 和 5.331×10^7 cells/L;庙前村浮游植物密度最低,仅为 2.183×10^7 cells/L(图4)。总体而言,各样点浮游植物密度组成均以蓝藻门和硅藻门为主,其他各门密度均较低,这种群落结构特征表明水体面临中营养至富营养化的风险^[7-8]。

本次调查运城市5个样点浮游植物平均生物量

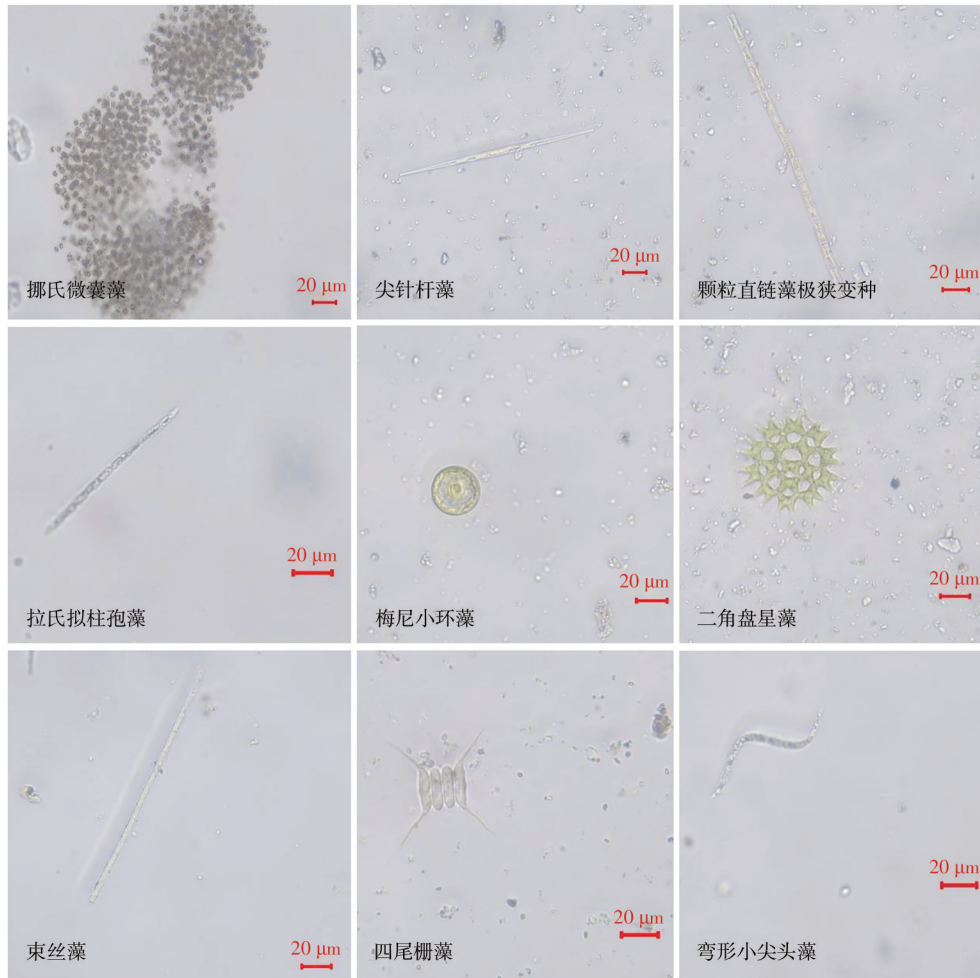


图 3 运城市 5 个调查样点典型浮游植物 (注:所有图片均来自本次调查样本)

Figure 3 Typical phytoplankton at five survey sites in Yuncheng City

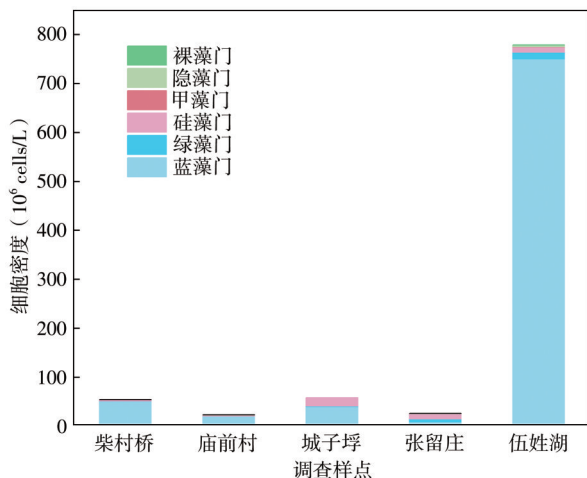


图 4 运城市 5 个调查样点浮游植物密度对比

Figure 4 Comparison of phytoplankton density at five survey sites in Yuncheng City

为 21.38 mg/L,其中蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、隐藻门和裸藻门浮游植物生物量分别为 1.58、0.31、16.07、0.88、0.15 和 2.39 mg/L,分别占总密

度的 7.37%、1.46%、75.16%、4.13%、0.68% 和 11.20%。5 个样点之间浮游植物生物量差异较大,其中伍姓湖样点生物量最大,为 41.04 mg/L;其次是张留庄和城子埭,分别为 23.77 和 23.16 mg/L;柴村桥样点浮游植物生物量最低,仅为 7.17 mg/L (图 5)。总体而言,各样点浮游植物生物量组成均以硅藻门为主,其他各门生物量均较低。

2.3 优势种分析

以浮游植物优势度指数大于 0.02 视为优势种,本次调查优势种共 4 种,其中蓝藻门 4 种,分别为假鱼腥藻 (*Pseudoanabaena* sp.)、细鞘丝藻 (*Leptolyngbya* sp.)、挪氏微囊藻 (*Microcystis novacekii*) 和细小隐球藻 (*Aphanocapsa elachista*),其优势度分别为 0.03、0.17、0.05 和 0.06 (表 2),其他物种的优势度相对较低。这些蓝藻优势种的出现,尤其是假鱼腥藻和挪氏微囊藻,通常标志着水生生态系统处于不稳定状态^[9-10]。

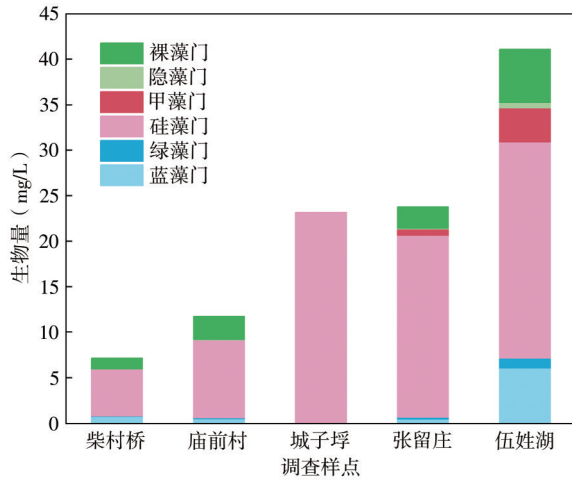


图5 运城市5个调查样点浮游植物生物量对比

Figure 5 Comparison of phytoplankton biomass at five survey sites in Yuncheng city

表2 运城市5个调查样点浮游植物优势种

Table 2 Dominant species of phytoplankton at five survey sites in Yuncheng City

优势种	出现频率	优势度
假鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> sp.	0.80	0.03
细鞘丝藻 <i>Leptolyngbya</i> sp.	1.00	0.17
挪氏微囊藻 <i>Microcystis novacekii</i>	0.20	0.05
细小隐球藻 <i>Aphanocapsa elachista</i>	0.20	0.06

2.4 多样性指数评价

整个调查区域浮游植物的 Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数和 Margalef 丰富度指数分别为 2.17、0.52、0.18 和 5.98 (图 6)。5 个样点相比,张留庄样点 Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均最高,分别为 2.31 和 0.69;城子埝样点 Shannon 多样性指数和柴村桥 Pielou 均匀度指数最低,分别为 1.03 和 0.42 (图 6)。城子埝样点 Simpson 优势度指数最高,为 0.51;张留庄样点 Simpson 优势度指数最低,为 0.15。伍姓湖样点 Margalef 丰富度指数最高,为 4.00;城子埝样点 Margalef 丰富度指数最低,为 1.88 (图 6)。Shannon 多样性指数表明,除张留庄断面属于轻度污染之外,其余采样点均为中度污染,尤其是柴村桥和城子埝断面。另外,Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数表明,柴村桥和城子埝断面均为中度污染。较低的均匀度指数和较高的蓝藻优势度,进一步印证了该水域生态系统稳定性正面临挑战,存在富营养化与水华风险^[11]。因此,需重视流域水质管理。

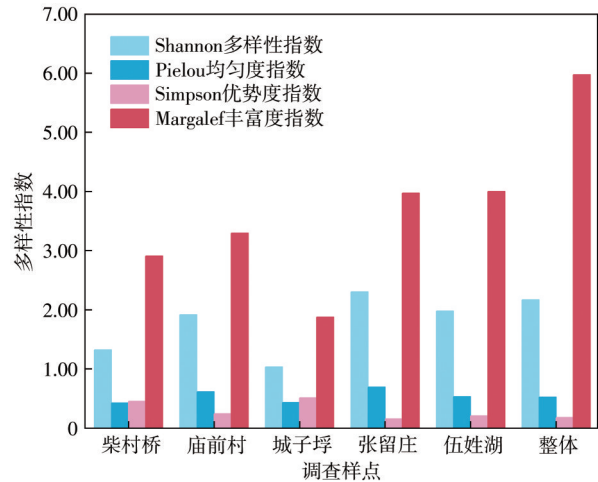


图6 运城市5个调查样点浮游植物多样性指数对比

Figure 6 Comparison of phytoplankton diversity index at five survey sites in Yuncheng City

3 生态治理策略

3.1 强化污染源控制,削减内外源负荷

(1)强化点源治理:加强对沿河、沿湖工业企业达标排放的监管,加快推进城镇生活污水处理厂的提标改造工程,确保出水水质,特别是氮、磷指标达到更高标准^[12-13]。(2)减少面源污染:在流域内推广生态农业,指导农民科学施肥,减少农田径流带来的氮磷负荷。建设河岸植被缓冲带,有效拦截地表径流中的污染物。(3)清理内源污染:对于底泥污染严重的区域(如伍姓湖),可在科学论证的基础上,实施环保疏浚,清除富含营养盐的底泥,减少内源释放。

3.2 推进水系生态修复,重构健康水生系统

(1)恢复水生植被:在湖滨带和河道浅水区,人工种植或恢复沉水植物(如苦草、眼子菜)、挺水植物(如芦苇、香蒲)群落^[14]。水生植物不仅能吸收水体中的营养盐,与藻类竞争资源,还能为浮游动物和鱼类提供栖息地,增强生态系统的自净能力和稳定性^[15]。(2)构建健康的水生食物网:合理放养鲢、鳙等滤食性鱼类,它们能直接滤食浮游植物,特别是蓝藻,是生物控藻的有效手段^[16]。同时,保护和发展大型枝角类浮游动物,利用其牧食压力控制藻类数量。(3)保障生态基流:通过水利工程调度,为汾河、涑水河等河流维持必要的生态基流,增强水体的流动性和复氧能力,破坏蓝藻喜静的生存环境。

3.3 构建水质与藻华预警监测体系

(1)构建监测网络:在关键断面和湖体建立自动化、实时化的水质监测站,连续监测水温、pH、溶解氧、叶绿素 a、蓝藻密度等关键指标。(2)建立预警模

型:利用历史数据和实时监测数据,构建蓝藻水华预测预警模型,实现对水华发生时间、规模和强度的提前预报。(3)制定应急方案:制定详细的藻华应急处置预案。一旦发生水华,可迅速启动,采取物理打捞、局部使用环保型除藻剂、增加水体循环等应急措施,最大限度降低其负面影响。

3.4 加强统筹管理与公众参与

推行“河(湖)长制”的精细化管理,明确责任,统筹协调各部门力量。同时,加强环保宣传,提高公众的节水意识和参与水环境保护的自觉性,从源头减少污染排放。

4 结论

本研究通过对运城市典型流域夏季丰水期全面调查,揭示了其浮游植物群落的现状:种类组成以硅藻、绿藻和蓝藻为主,但蓝藻门在数量上较多;伍姓湖浮游植物密度偏高;群落优势种全部为蓝藻;多样性指数评价表明,水体整体处于中度污染状态,生态系统稳定性面临挑战。

综上所述,运城市典型流域的夏季丰水期水生态环境保护形势严峻,治理工作刻不容缓。后续研究会进一步开展多季节、跨年度的系统监测,以全面揭示该区域浮游植物群落的演替规律及其对环境变化的响应机制。对于未来的治理,应坚持“防治结合,生态优先”的原则,通过严格控制外源和内源污染、大力实施生态修复工程、建立科学的预警监控体系等多措并举,系统性地提升流域水环境质量与生态健康水平,保障区域水资源的安全与可持续利用。

参考文献:

[1] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等.我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(3):92-98. DOI:10.3969/j.issn.1003-6504.2010.03.022.

[2] Wurtsbaugh W A, Paerl H W, Dodds W K. Nutrients, eutrophication and harmful algal blooms along the freshwater to marine continuum[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2019, 6(5): e1373. DOI:10.1002/wat2.1373.

[3] Tekebayeva Z, Bazarkhankyzy A, Temirbekovaz A, et al. Ecological Assessment of Phytoplankton Diversity and Water Quality to Ensure the Sustainability of the Ecosystem in Lake Maybalyk, Astana, Kazakhstan[J]. *Sustainability*, 2024, 16(22): 9628. DOI: 10.3390/su16229628.

[4] 陈豪,徐洪增,路民,等.东平湖水体营养化状况综合评价[J].人民黄河,2022,44(1):83-88. DOI:10.3969/j.

issn.1000-1379.2022.01.018.

- [5] 张旭,周丽,蔡敏,等.基于形态学和宏基因组学的养殖蟹塘浮游植物群落分析[J].南方水产科学,2024,20(1):151-160. DOI:10.12131/20230141.
- [6] Gong Donghui, Guo Ziqing, Wei Wenxue, et al. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in Nanhai Lake [J]. *Diversity*, 2022, 14(11): 927. DOI:10.3390/d14110927.
- [7] 张家路,王银平,蔺丹清,等.扬中夹江浮游植物种群特征及其对环境因子的响应[J].上海海洋大学学报,2019,28(4):607-615. DOI:10.12024/jsou.20180802372.
- [8] 殷燕,刘玉飞,乐志芳,等.嵊泗列岛典型水库春季浮游植物群落组成及其与环境因子关系[J].环境生态学,2025,7(10):106-113. DOI:10.3969/j.issn.2096-6830.2025.10.15.
- [9] 黄成,侯伟,顾继光,等.珠江三角洲城市周边典型中小型水库富营养化与蓝藻种群动态[J].应用与环境生物学报,2011,17(3):295-302. DOI:10.3724/SP.J.1145.2011.00295.
- [10] Dutta S, Dhan S A, Uddin S N, et al. Phytoplankton as an indicator of Eutrophication [J]. *Ecology, Environment and Conservation Paper*, 2023, 29(3): 1042-1052. DOI:10.53550/eec.2023.v29i03.004.
- [11] Watson S B, Miller C, Arhonditsis G, et al. The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia[J]. *Harmful Algae*, 2016, 56: 44-66. DOI:10.1016/j.hal.2016.04.010.
- [12] Howarth R, Chan F, Conley D J, et al. Coupled biogeochemical cycles: eutrophication and hypoxia in temperate estuaries and coastal marine ecosystems [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(1): 18-26. DOI:10.1890/100008.
- [13] 李港,林妙丽,陈诚,等.京杭运河苏北段秋冬季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].水生生态学杂志,2021,42(5):119-126. DOI:10.15928/j.1674-3075.202105250164.
- [14] 殷雪妍,严广寒,汪星.太湖湖滨带水生植被恢复技术集成与应用浅析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2021,4:26-38. DOI:10.3969/j.issn.1000-5641.2021.04.004.
- [15] Li Qisheng, Han Yanqing, Chen Kunquan, et al. Effects of water depth on the growth of the submerged macrophytes *Vallisneria spiralis* and *Hydrilla verticillata*: implications for water level management[J]. *Water*, 2021, 13(18): 2590. DOI: 10.3390/w13182590.
- [16] 于斌,窦强,傅纯洁.网箱养殖鳊鲢对海陵湖水体富营养化的影响调查[J].水产养殖,2024,45(11):28-35. DOI:10.3969/j.issn.1004-2091.2024.11.005.



李剑锋,男,教授,博士生导师,国家高层次人才科技创新领军人才,国家重点研发计划项目首席科学家。现任山西大学环境学院副院长,山西省黄河实验室副主任,兼任中国环境科学学会水处理与回用专业委员会委员。主要从事工业废水深度处理与回用、抗污染膜材料及节能膜浓缩等方面的研究,负责承担了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目、山西省揭榜招标重大项目等科研项目,在 *EST*, *Water Research* 等期刊发表论文 80 余篇,授权国家发明专利 20 余项,研发技术应用于焦化、钢铁冶金等行业的高效节水和非常规水资源开发利用,获山西省科技进步一等奖等省部级奖励 5 项。Email:lijianfeng@sxu.edu.cn



程芳琴,女,教授,博导,国家卓越工程师,国家环境保护煤炭废弃物资源化高效利用技术重点实验室、CO₂减排与资源化利用教育部工程研究中心主任;国家“新世纪百千万人才工程”入选者,何梁何利基金科学与技术创新奖获得者,享受国务院特殊津贴专家。长期致力于工业固废处理与处置的关键技术研发与工程化应用。先后承担并完成国家重点研发计划、国家“863”计划课题、国家自然科学基金重点项目及省部级重大科研项目。以第一或通讯作者在 *Nat. Sustain.*, *Nat. Commun.*、*Engineering* 等期刊发表 SCI 论文 200 余篇;授权专利 90 余项;出版转化专著 5 部;以第一完成人获得省部级科技奖项 10 余项,其中国家科技进步二等奖 2 项,山西省科技进步特等奖 1 项,山西省科技进步一等奖 4 项;探索出“政产科教”四位一体研究生培养新模式,获国家级教学成果二等奖;被授予“全国五一巾帼标兵”“全国三八红旗手”等荣誉称号。带领的团队被授予转型跨越“山西青年五四奖状”“山西省模范集体”等称号。Email:cfangqin@sxu.edu.cn

(责任编辑:陈立)