

涡河中下游浮游植物时空分布及成因

梁 建^{1,2}, 路伟亭^{1,2}

(1. 安徽省水利部淮委水利科学研究院, 安徽 合肥 230088; 2. 安徽省水利资源重点实验室, 安徽 蚌埠 233000)

摘要:为探明涡河中下游水质状况,基于 2016 年 12 月至 2017 年 9 月涡河中下游 4 次监测的浮游植物和水质数据,利用物种优势度和多样性指数对浮游植物的时空分布特征进行定量分析。结果表明:涡河中下游的浮游植物主要表现出种类分布不均匀、不同河段差异性大等特点;涡河中下游共发现浮游植物 7 门 89 属种,以绿藻门和硅藻门为主;浮游植物的优势类群随季节变化较大,4 次采样共发现 16 个优势物种,4 个季节中绿藻门的优势种类均为最多;浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数水质评价等级显示涡河中下游整体污染程度呈转好趋势;冗余度分析表明环境因子对浮游植物时空分布总体变异的解释度为 60.02%;温度、电导率和总磷是影响涡河中下游浮游植物时空分布的主要环境因子。

关键词:涡河;浮游植物;群落结构;环境因子;冗余度分析

中图分类号:Q178.1 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2019)05-0043-06

Spatial and temporal distributions and the cause analysis of phytoplankton in the middle and lower reaches of Guo River//LIANG Jian^{1,2}, LU Weiting^{1,2}(1. Anhui & Huaihe Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China; 2. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu 233000, China)

Abstract: To evaluate the water quality in the middle and lower reaches of the Guo River, the spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton were quantitatively analyzed using species dominance and diversity indices methods based on four measuring data samples of phytoplankton and water quality from December 2016 to September 2017. The results show that the phytoplankton distributed unevenly in the main stream and differed greatly among different river sections. A total of 7 species and 89 genera of phytoplankton were found in the Guo River, in which Chlorophyta and Bacillariophyta were the main species. Furthermore, the dominant species of phytoplankton varied greatly with the seasons. A total of 16 dominant species were found in the four samples and those of Chlorophyta were the most in all four seasons. Shannon-Wiener diversity index evaluation grade reflects that the overall trend of water pollution was gradually improved. In addition, redundancy analysis results display that the environmental factors explained 60.02% of the overall variation in spatial and temporal distributions of the phytoplankton. Moreover, temperature, conductivity and total phosphorus were the main environmental factors affecting spatial and temporal distributions of phytoplankton in the middle and lower reaches of the Guo River.

Key words: Guo River; phytoplankton; community structure; environmental factors; redundancy analysis

近年来伴随着人口的快速增长和社会经济的迅猛发展,水资源短缺和水污染问题较为突出。我国复杂而脆弱的生态系统在短期内集中显现了各种流域危机,多数流域都出现了不同程度的季节性缺水、水质型缺水、物种多样性降低、湿地萎缩和生态系统退化等问题。国内外学者^[1-4]自 20 世纪初开展了河流中浮游植物的研究,并利用浮游植物特征来评价河流生态系统状况。淮河流域近年来进行了相关研究,颍河^[5]以及淮河干流^[6]等都进行了浮游植物调查工作。

浮游植物是水域生态系统的初级生产者,其群落结构对水体环境变化反应非常灵敏,因此众多学者用浮游植物反映水体健康状况^[6],以期弥补理化指标在水质评价上的不足。浮游植物是反映河流健康的重要指示物种之一,其群落结构变化可以为水质变化提供早期预警^[7]。国内外学者对浮游植物群落结构和环境因子的响应关系以及利用浮游植物进行水质评价进行了大量研究^[8],常用 Pielou 均匀度指数、Margalef 物种丰富度指数、Shanno-Wiener 物种丰富度指数等表征水体污染程度。浮游植物群落

基金项目:安徽省水利科技计划(slkj2016-06)

作者简介:梁建(1984—),男,工程师,硕士,主要从事水质与水生态研究。E-mail: sdauj@163.com

结构变化受周围因素影响,主要包含两个方面^[9]:一是生物因子,如不同生物之间捕食、寄生和竞争等;二是非生物因子,如温度、辐射、盐度、海流和有机物等。研究表明:温度对藻类的光合作用能力、呼吸速率和生长率都有重要作用,不同藻类都有其最适宜温度范围^[10],温度可以影响浮游植物群落季节变化;浮游植物的变化趋势与水体中营养盐的变化趋势一致,氮、磷是浮游植物生长所需的主要营养元素^[11];溶解氧、光照、pH、透明度等对浮游植物群落结构也有一定影响^[8];另外河道的梯级开发使河道水流由动水变为静水,水体垂向分层明显,自净能力下降,有利于浮游植物的生长与繁殖,易导致水体的富营养化^[12-13]。

淮河流域涡河水系是受人为干扰较为严重的流域之一。为探明人类活动对涡河水系生态系统影响的范围和程度,于2016年12月至2017年9月开展了涡河水系水生态系统健康评估工作,采用4个季度涡河中下游的4次浮游植物和水质监测数据,详细分析涡河中下游不同采样点以及河段间的浮游植物种类组成、群落结构,并对涡河中下游的生态健康状况做出科学评价,以期为涡河生态环境保护 and 可持续发展提供参考。

1 研究方法

1.1 流域简介

涡河位于我国南北气候过渡带,属暖温带半湿润季风气候区,多年平均降水量752 mm,汛期6—9

月为多雨季节,降水量占全年的63%。涡河发源于河南省开封市黄河南岸的尉氏县,横跨豫皖两省,是淮河的第二大支流,东南流经开封、通许、扶沟、太康、鹿邑和安徽省的亳州、涡阳、蒙城,于怀远县城附近注入淮河,全长396 km,流域面积为1.59万km²。涡河水系近于羽状,其中亳州市惠济河口以上为上游,以下为中下游。安徽省地处涡河中下游,境内流域面积4340 km²,河道长度226 km。在安徽境内涡河中下游依次建有大寺、涡阳和蒙城3座节制闸,涡河汇入淮河后在其河口下游建有蚌埠闸。

1.2 野外调查

4次野外调查时间分别设在2016年12月、2017年3月、2017年6月和2017年9月。根据涡河中下游水闸的位置,将整个涡河划分为5个采样河段,分别为省界—大寺闸河段、大寺闸—涡阳闸河段、涡阳闸—蒙城闸河段、蒙城闸以下河段、涡河河口以上河段。每个采样河段均设置2个采样点,如图1所示。省界—大寺闸河段采样点为1号(115.76°N,33.89°E)、2号(115.79°N,33.88°E);大寺闸—涡阳闸河段采样点为3号(116.03°N,33.64°E)、4号(116.16°N,33.55°E);涡阳闸—蒙城闸河段采样点为5号(116.31°N,33.46°E)、6号(116.47°N,33.36°E)、蒙城闸以下河段采样点为7号(116.64°N,33.25°E)、8号(116.89°N,33.14°E)、涡河河口以上河段采样点为9号(116.97°N,33.04°E)、10号(117.19°N,32.97°E)。

浮游植物定量样品使用有机玻璃采水器,依据

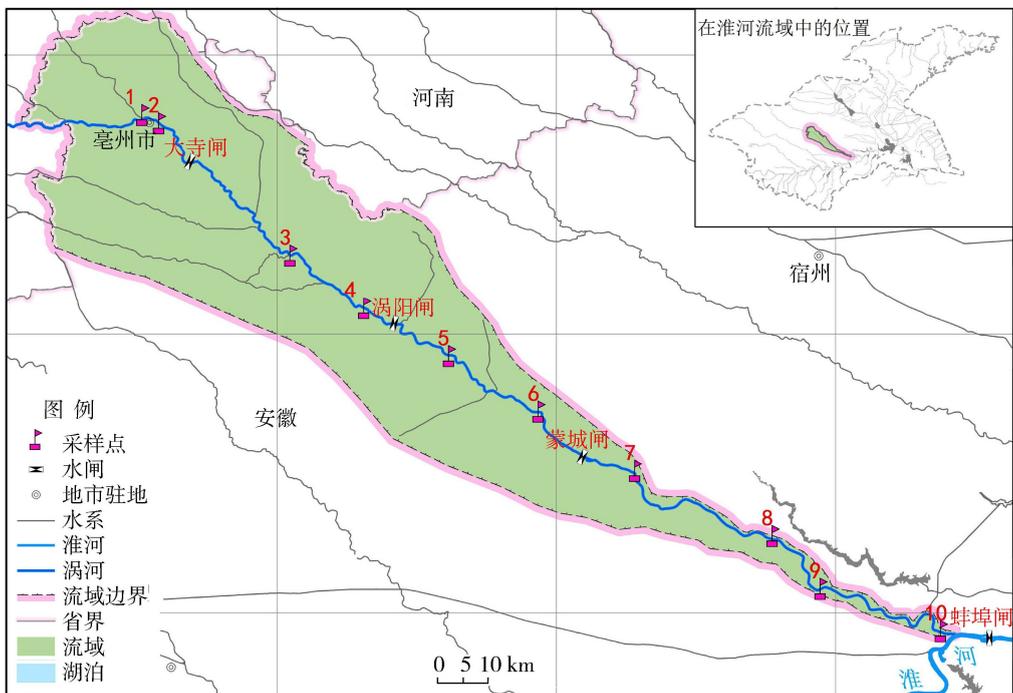


图1 涡河中下游浮游植物采集样点分布

水体深浅程度进行分层采集。采集所得水样用容积为 1000 mL 的聚乙烯瓶装满,并立即使用鲁哥氏液固定,用于定量分析^[14]。

浮游植物的计数方法采用目镜视野法进行,使用 0.1 mL 浮游生物计数框对浮游植物细胞数进行计数。同时,每个浮游植物种类至少测量足够数量的个体(一般 30 个)的长、宽、厚,根据相应几何形状计算出平均体积,再根据相应公式得出生物量。

水样测试指标包括在现场用多探头水质检测仪测定的 pH 值、溶解氧(DO)、水温(WT)和电导率(CON)和在室内化学实验室测定的氨氮(NH₄-N)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、五日生化需氧量(BOD₅)、化学需氧量(COD)和氟化物(F⁻)。

1.3 数据处理方法

本文主要采用 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 对浮游植物进行评价, H' 值采用文献[6]的方法计算。优势度 D 表示物种群落内优势状态的测定值,计算和评价标准采用文献[15]的方法, $D \geq 0.02$ 的物种为优势种。

由于观测的环境因子种类较多,故采用偏相关分析系数来度量两个环境因子之间的密切程度,排除与其他环境因子偏相关性较高的因子。具体偏相关系数计算采用文献[16]的方法,偏相关分析由 R3.4.3 软件完成。

冗余度分析可用于展示能被环境因子解释的物种分布变化量,进而研究种群与环境之间的关系。数据分析前对浮游植物生物量和环境因子数据进行归一化处理,以剔除数量级和不同单位对数据分析的影响。分析采用 R3.4.3 软件,调用 vegan 函数包完成。

2 结果与讨论

2.1 关键环境因子识别

根据各个环境因子间的偏相关性程度(表 1),剔除具有显著相关性的环境因子(相关系数 $r > 0.5$,显著性水平 $P < 0.05$)^[16]。剔除与其他相关性较高

的化学需氧量,保留 9 个主要环境因子:水温、pH、总磷、溶解氧、高锰酸盐指数、电导率、氨氮和五日生化需氧量。

2.2 浮游植物组成及空间分布

2.2.1 浮游植物组成

4 次采样期间,共发现浮游植物 7 门 89 属种(表 2)。从属种上看,绿藻门和硅藻门的种类最丰富,分别占总数的 35.96% 和 33.71%,与淮河流域浮游植物种类组成以绿藻门和硅藻门的种类为主的研究结果一致^[17]。冬春季节均以硅藻门的种类最多,其次为绿藻门,与文献[18]淮河流域冬季(1 月份)适宜硅藻门物种生长、繁殖的研究结果和文献[17]淮河流域春季浮游植物以绿藻门和硅藻门的种类为主的研究结果一致。夏秋季节以绿藻门的种类最多,其次为硅藻门,与文献[19]夏季涡河以蓝藻和绿藻为主的研究结果稍有区别。

表 2 涡河中下游浮游植物种类分布

季节	蓝藻门	绿藻门	硅藻门	甲藻门	隐藻门	金藻门	裸藻门	合计
冬	3	12	14	1	5	1	1	37
春	1	14	20	2	5	2	2	46
夏	7	21	10	3	4	0	3	48
秋	9	25	18	1	5	2	1	61
全年	12	32	30	3	5	2	5	89

涡河中下游浮游植物群落结构组成季节变化明显,这与水温变化状况相关性较大。夏秋季节物种数量大于冬春,且夏秋季节以绿藻门为主,而冬春季节以硅藻门为主。蓝藻适宜在较高的温度中生存^[10],表 2 中蓝藻数量夏秋季节明显高于冬春季节;硅藻适应的温度较低,易在春季形成优势^[10],表 2 中硅藻物种数量在春季较其他 3 个季节偏高;绿藻在温度较高的夏季出现高峰^[20],与表 2 中绿藻物种数量的变化较一致。

涡河浮游植物各采样点总生物量质量浓度在 0.18 ~ 91.39 mg/L 之间变动,合计生物量质量浓度为 9.70 mg/L。从生物量组成来看,以甲藻门、绿藻门和隐藻门为主(表 3)。

表 1 涡河中下游环境因子偏相关系数

环境因子	WT	pH	TP	NH ₄ -N	CON	COD _{Mn}	BOD ₅	COD	DO	F ⁻
WT	1									
pH	0	1								
TP	-0.08	-0.41 *	1							
NH ₄ -N	-0.48 *	-0.04	0.35 *	1						
CON	0.16	0	0.01	-0.02	1					
COD _{Mn}	-0.18	-0.26 *	0.42 *	0.25 *	0.28	1				
BOD ₅	-0.39 *	-0.11	0.37 *	0.43 *	-0.09	0.45 *	1			
COD	-0.05	-0.31 *	0.25 *	0.16	0.39 *	0.68 *	0.52 *	1		
DO	-0.58 *	0.21	-0.14	0.12	-0.01	0.1	0.23 *	0.01	1	
F ⁻	0.02	-0.12	0.08	0.1	0.38 *	0.36 *	0.03	0.35 *	0	1

注: * 为显著性检验 $P < 0.05$ 的值。

表3 涡河中下游浮游植物平均生物量组成

门类	生物量质量浓度/(mg·L ⁻¹)	相对生物量/%
蓝藻门	0.06	0.64
绿藻门	1.71	17.65
硅藻门	0.89	9.17
甲藻门	4.86	50.06
隐藻门	0.91	9.40
裸藻门	0.45	4.62
金藻门	0.82	8.47

2.2.2 浮游植物时空变化分布

涡河浮游植物物种涵盖了蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门、隐藻门、裸藻门和金藻门7个门类,浮游植物总密度在 $0.75 \times 10^6 \sim 96.87 \times 10^6$ 个/L 之间变动。

涡河中下游浮游植物密度时空变化如图2所示,蓝藻门的密度变化很大程度地影响了总密度的变化,但蓝藻门在空间上分布不均,1号和2号采样点的密度明显高于其他采样点,这在很大程度上取决于蓝藻门的伪鱼腥藻的密度。1号和2号采样点伪鱼腥藻密度占总密度的百分比分别是59.60%(春)、60.66%(夏)、79.54%(秋)和51.45%(春)、54.80(夏)、60.01%(秋)。伪鱼腥藻是指示水质为生物密度/(10^6 个·L⁻¹)

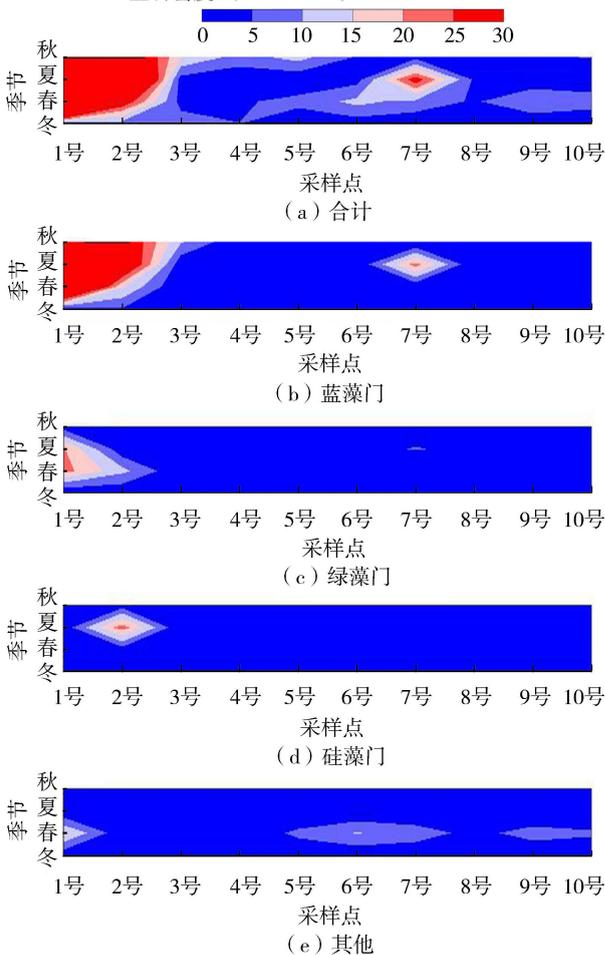


图2 涡河中下游浮游植物密度时空变化

α -中污型状态的物种^[21],其大量出现在1号和2号采样点,说明1号和2号采样点水质状况在春、夏、秋季为中污染。集胞藻在7号采样点的夏季样品中大量出现,其密度占该点总密度的76.84%,致使该点的密度偏大。

2.2.3 优势物种分析

浮游植物的优势类群随季节变化较大,其分布情况如表4所示。4次采样,共发现16个优势物种,其中绿藻门的优势种类均最多,但优势度最大类群却各不相同,冬季以隐藻门的具尾逗隐藻最大,春、夏和秋季以蓝藻门的伪鱼腥藻最大。春、夏、秋季伪鱼腥藻大量出现在1号和2号采样点,集胞藻大量出现在夏季的7号采样点,致使伪鱼腥藻和集胞藻优势度较大,与图2中浮游植物密度分布一致。

表4 涡河中下游浮游植物优势种及其优势度

门	优势物种	冬季	春季	夏季	秋季
蓝藻门	弱细颤藻	0.209*			
	伪鱼腥藻		0.247*	0.400*	0.387*
	集胞藻			0.105*	0.015*
	弯形小尖头藻				0.035*
绿藻门	四尾栅藻	0.023*	0.002	0.014	0.036*
	月牙藻	0.004	0.078*	0.002	0.006
	卵囊藻	0.022*	0.002	0.011	0.014
	球衣藻		0.025*		0.005
	四足十字藻	0.008		0.031*	
	四尾栅藻	0.023*	0.002	0.014	0.036*
硅藻门	实球藻		0.002	0.085*	0.005
	小环藻	0.093*	0.018	0.013	0.072*
隐藻门	颗粒直链藻	0.056*		0.082*	0.004
	具尾逗隐藻	0.221*	0.096*		0.042*
金藻门	马索隐藻	0.014	0.037*		0.035*
	金藻门 黄群藻		0.083*	0.1*	

注: * 为优势度大于0.02的物种。

2.2.4 Shannon-Wiener 多样性指数分析

采用 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 划分评价等级:[0,1)为重污染;[1,3)为中污染;[3,4)为轻污染;不小地4为清洁无污染^[4]。

Shannon-Wiener 多样性指数时空变化及等级评价结果如图3所示,指数介于1.09~4.25之间,均值为2.65。4次采样处于中污型状态的站点数量冬季有9个,春季有8个,夏季有6个,秋季有4个。

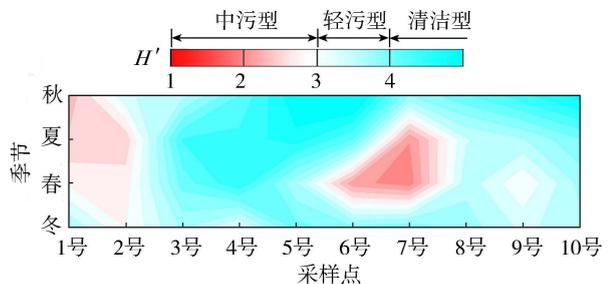


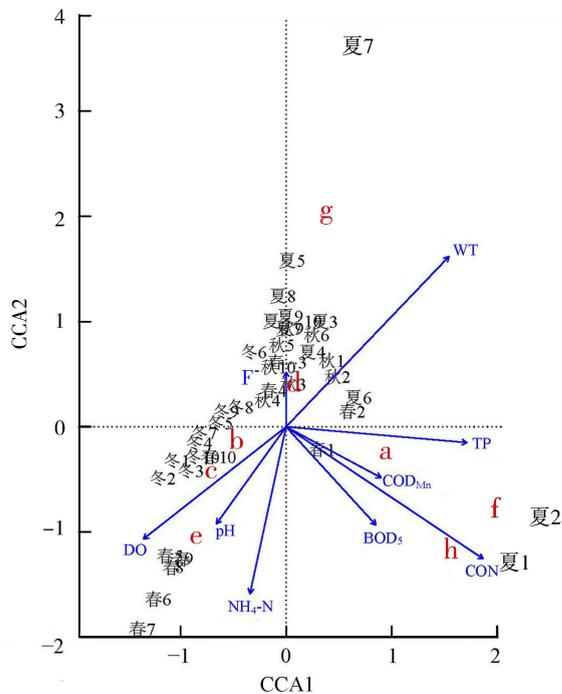
图3 Shannon-Wiener 多样性指数时空变化及等级评价结果

调查期间,涡河中污型状态的站点减少,轻污染和清洁型状态的站点逐渐增加。文献[19]于2015年夏季对淮河干流及其主要支流浮游植物群落多样性进行了评价,其中对涡河进行了4个站点的调查,均处于中污状态。本次调查的10个站点中,有4个站点处于轻污染状态,说明涡河的污染程度有转好趋势。

2.3 浮游植物群落与环境因子关系的冗余度分析

选取浮游植物优势种作为分析对象,对优势种生物量与水温、pH、总磷、氨氮、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、电导率、氟化物、溶解氧等环境因子进行冗余度分析。涡河浮游动物群落除趋势对应分析(DCA)结果显示,排序轴梯度长度(LGA)为4.2384,大于4,适用典型相关分析(CCA)方法。

图4为浮游植物与环境因子的CCA排序图的前两轴,表5表示环境因子与浮游植物的CCA分析检验情况,方差贡献越大,影响程度越大,解释度越大。CCA分析表明,环境因子对浮游植物时空分布的总体变异解释度为60.02%,水温(10.98%)、电导率(12.44%)和总磷(9.77%)是影响涡河中下游浮游植物时空分布的主要环境因子。前两轴的解释



a—伪鱼腥藻, b—具尾逗隐藻, c—弱细颤藻, d—小环藻, e—黄群藻, f—颗粒直链藻, g—集胞藻, h—实球藻; 图中各采样点以“季节”+“采样点编号”组成, 如“夏1”, 代表夏季的第1个采样点

图4 涡河中下游浮游植物与环境因子的CCA排序

表5 涡河中下游浮游植物冗余度分析成果检验

指标	CCA1 值	CCA2 值	r	P	解释度/%
WT	0.72	0.69	0.48	0.001	10.98
CON	0.84	-0.55	0.56	0.001	12.44
TP	0.99	-0.15	0.32	0.032	9.77

度为31.29%, 水温(-0.72)、电导率(-0.84)和总磷(0.99)与第1轴正相关; 水温(0.69)与第2轴正相关, 电导率(-0.55)和总磷(-0.15)与第2轴负相关。伪鱼腥藻、集胞藻、颗粒直链藻、小环藻、实球藻等与水温正相关; 伪鱼腥藻、集胞藻、颗粒直链藻、实球藻等与电导率正相关; 伪鱼腥藻、集胞藻、颗粒直链藻、实球藻等与总磷正相关。

3 结论

涡河中下游浮游植物主要表现出种类分布不均匀、不同河段差异性大等特点。4次采样共发现浮游植物7门89属种, 以绿藻门和硅藻门为主。从生物量组成来看, 以甲藻门、绿藻门和隐藻门为主, 分别占总生物量的50.06%、17.65%和9.40%, 总体生物量质量浓度为9.70 mg/L。浮游植物种类和生物量时空分布差异显著。

浮游植物的优势类群随季节变化较大, 4次采样共发现16个优势物种。主要优势种伪鱼腥藻大量出现在1号和2号采样点, 在流域中是绝对优势藻种, 指示水质为中污型状态, 需要引起高度重视。

涡河的Shannon-Wiener多样性指数显示流域内多数采样点处于中-轻污染状态, 与各站点优势种评价结果相一致, 说明浮游植物可以作为河流水质状况的评价指标。多样性指数显示, 涡河的水质状况呈转好趋势。

冗余度分析表明, 环境因子对浮游植物时空分布的总体变异解释度为60.02%, 水温(10.98%)、电导率(12.44%)和总磷(9.77%)是影响涡河中下游浮游植物时空分布的主要环境因子。

参考文献:

[1] BORICS, GÁBOR, GÖRGÉNYI, et al. The role of phytoplankton diversity metrics in shallow lake and river quality assessment[J]. Ecological Indicators, 2014, 45: 28-36.

[2] 徐宗学, 武玮, 殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1): 23-30. (XU Zongxue, WU Wei, YIN Xuwang. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 23-30. (in Chinese))

[3] 于一雷, 郭菊兰, 武高洁, 等. 清澜港红树林浮游植物群落结构及水质对应分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 102-110. (YU Yilei, GUO Julan, WU Gaojie, et al. Phytoplankton community structure and water quality correspondence analysis of mangrove forests in Qinglan

- Harbor[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2): 102-110. (in Chinese))
- [4] 王昊天,刘凌,陈宁,等. 浮游植物对摇蚊幼虫扰动的响应研究[J]. *水资源保护*, 2017, 33(2): 88-94. (WANG Haotian, LIU Ling, CHEN Ning, et al. Research on effect of chironomid larvae bioturbation on phytoplankton [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 88-94. (in Chinese))
- [5] 袁家辉,孙常乐. 浮游植物评价颍河水质污染研究[J]. *阜阳师范学院学报(自然科学版)*, 2004(3): 46-49. (YUAN Jiahui, SUN Changle. An evaluation of water pollution and studies of the Ying River by means of phytoplankton [J]. *Journal of Fuyang Normal University (Natural Science)*, 2004(3): 46-49. (in Chinese))
- [6] 朱为菊,庞婉婷,尤庆敏,等. 淮河流域春季浮游植物群落结构特征及其水质评价[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(3): 637-645. (ZHU Wei ju, PANG Wanting, YOU Qingmin, et al. Phytoplankton community structure and the evaluation of water quality in spring, Huaihe River Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(3): 637-645. (in Chinese))
- [7] LEPPARD G G, MUNAWAR M. The ultrastructural indicators of aquatic ecosystem health [J]. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 1992, 1(4): 309-317.
- [8] 张云,马徐发,郭飞飞,等. 湖北金沙河水库浮游植物群落结构及其与水环境因子的关系[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 902-910. (ZHANG Yun, MA Xufa, GUO Feifei, et al. Community structures of phytoplankton and their relationships with environmental factors in the Jinshahe Reservoir, Hubei Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 902-910. (in Chinese))
- [9] 李秋华,韩博平. 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2355-2364. (LI Qiuhua, HAN Boping. Structure and dynamics of phytoplankton community based CCA analysis in a pumped storage reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2355-2364. (in Chinese))
- [10] 梅洪,赵先富,郭斌,等. 中国淡水藻类生物多样性研究进展[J]. *生态科学*, 2003, 22(4): 356-359. (MEI Hong, ZHAO Xianfu, GUO Bin. Advances in freshwater algal biodiversity in China [J]. *Ecologic Science*, 2003, 22(4): 356-359. (in Chinese))
- [11] 唐汇娟. 武汉东湖浮游植物生态学研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2002.
- [12] 纪道斌,龙良红,徐慧,等. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3): 7-14. (JI Daobin, LONG Lianghong, XU Hui, et al. Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3): 7-14. (in Chinese))
- [13] 姜翠玲,王俊. 我国生态水利研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(5): 168-175. (JIANG Cuiling, WANG Jun. Recent advances of ecological water conservancy in China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5): 168-175. (in Chinese))
- [14] 朱为菊. 淮河流域浮游植物群落分布格局及其影响因素[D]. 上海:华东师范大学, 2015.
- [15] 徐兆礼. 东海亚强真哲水蚤种群生态特征[J]. *生态学报*, 2006(4): 1151-1158. (XU Zhaoli. Ecological characters of the Eucalanus subcrassus population in the East China Sea [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006(4): 1151-1158. (in Chinese))
- [16] TANG T, CAI Q, LIU J. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2006, 112(1/2/3): 347.
- [17] 吴奇丽,林志,汪晨琛,等. 淮河上游典型支流浮游植物群落结构特征[J]. *生物学杂志*, 2018, 35(4): 67-71. (WU Qili, LIN Zhi, WANG Chenchen, et al. Analysis dynamics of phytoplankton community characteristics in typical tributaries of the upper reaches of Huaihe River [J]. *Journal of Biology*, 2018, 35(4): 67-71. (in Chinese))
- [18] 赵秀侠,侯冠军,李静,等. 2015 年淮河干流安徽段浮游植物群落结构特征[J]. *湿地科学*, 2017, 15(4): 497-504. (ZHAO Xiuxia, HOU Guan jun, LI Jing, et al. Characteristics of community of phytoplankton in Anhui section of mainstream of Huai River in 2015 [J]. *Wetland Science*, 2017, 15(4): 497-504. (in Chinese))
- [19] 邱阳凌,林育青,刘俊杰,等. 淮河干流及主要支流夏季浮游植物群落生物多样性评价[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1665-1672. (QIU Yangling, LIN Yuqing, LIU Junjie, et al. The biodiversity assessment of phytoplankton community in summer within main stream and tributary of Huaihe River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1665-1672. (in Chinese))
- [20] TILMAN D, KIESLING R L. Freshwater algal ecology: taxonomic tradeoffs in the temperature dependence of nutrient competitive abilities [C]//International Symposium on Microbial Ecology. Oxford: Oxford University Press, 1984: 314-319.
- [21] 况琪军,胡征宇,周广杰,等. 香溪河流域浮游植物调查与水质评价[J]. *武汉植物学研究*, 2004(6): 507-513. (KUANG Qijun, HU Zhengyu, ZHOU Guangjie, et al. Investigation on phytoplankton in Xiangxi River Watershed and the evaluation of its water quality [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004(6): 507-513. (in Chinese))

(收稿日期:2018-08-17 编辑:郑孝宇)