

江苏省沂北地区典型水库群 浮游植物群落结构特征

颜秉龙¹, 栾承梅², 陈 翔³, 李敏娟³, 燕文明³, 吴挺峰^{4*}

(1. 连云港市水利规划设计院有限公司, 江苏 连云港 222006; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
4. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:以江苏省沂北地区6座水库组成的水库群为研究对象,通过丰水期和枯水期的2次调查,分析水库群浮游植物群落的时空分布特征及影响因素。研究揭示了水文特征对沂北地区水库群浮游植物群落结构的重要影响,将为该地区水库生态安全管理提供理论依据。

关键词:水文特征;浮游植物;多样性指标;水库群;沂北地区

中图分类号:X524 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2022)05-0001-0005

Phytoplankton community structure characteristics of typical reservoir group in Yibei area, Jiangsu Province

YAN Binglong¹, LUAN Chengmei^{2*}, CHEN Xiang³, LI Minjuan³,
YAN Wenming³, WU Tingfeng^{4*}

(1. Lianyungang Water Conservancy Planning and Designing Institute Co., Ltd., Lianyungang 222006, China;
2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;
3. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering Science, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In this study, two field investigations in wet and dry seasons were conducted to analyze the spatiotemporal distribution of phytoplankton community and its influencing factors in a reservoir group consisting of six reservoirs in Yibei area, Jiangsu Province. This study revealed the importance of hydrological characteristics on phytoplankton community structure of the reservoir group in Yibei area, and can be helpful for the reservoir ecological safety management in this area.

Key words: hydrological characteristics; phytoplankton; diversity indicator; reservoir group; Yibei area

国内外已经开展了大量有关水库富营养化和浮游植物问题研究^[1-2]。相对于湖泊,不同水库浮游植物水华的始发水域较为固定,多为库尾河流相区。这是库尾水域充足的营养盐供给、良好的光照

和长水力停留时间等有利于浮游植物生长的环境条件所决定的。河流相区往下游,依次为过渡区和湖泊相区,水质也逐渐改善。不过,尽管对单个水库浮游植物时空分布特征已经有较多的认识,但是

收稿日期:2022-03-10

基金项目:江苏省水利科技项目(2021049);国家自然科学基金项目(41971047)

作者简介:颜秉龙(1978—),男,高级工程师,硕士,主要从事水文水资源方面研究工作。E-mail:37419626@qq.com

通信作者:吴挺峰(1981—),男,副研究员,博士,主要从事水环境数值模拟研究工作。E-mail:tfwu@niglas.ac.cn

对位于同一水系中的由多个水库组成的水库群浮游植物空间分布的研究较少。而这对依赖水库供水地区水库空间布局和生态安全维护是非常重要的。

为此,本研究以位于江苏省沂北地区的石梁河水库集水区6座中型水库所组成的水库群为研究对象,基于枯水和丰水期的2次库区水域富营养化调查,结合水库水文特征,评估水库群富营养化状况,研究水库群浮游植物时空分布特征及其主要影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究区域

位于黄淮海平原的江苏省沂北地区年均气温13.7℃、降水量869.9 mm、风速3.1 m/s,属于暖温带湿润季风气候。作为著名的“洪水走廊”,沂北地区的水资源具有时空分布不均的特点,因此需要修建大量水库以调节这种不均匀性。其中沂北地区的东海县有“百库之县”的称号,其境内的大石埠水库、贺庄水库、昌梨水库、羽山水库、横沟水库和房山水库相互之间有河道联通,组成了该区域最大的水库群。水库群位于由龙梁河、石安河和沐新河等构成的水系上。该水系的水流主要自西南流向东北,并最终汇入石梁河水库及其所在的新沐河。除汇集各水库流域所产水量外,大石埠水库、贺庄水库、昌梨水库和羽山水库调引流龙梁河水,横沟水库和房山水库分别由上游羽山水库和安峰山水库供水。

该水库群内各水库均为中型水库(表1),具有防洪、灌溉和养殖等功能,是区域经济社会发展的重要保障。已经开展的针对该水库群部分水库调查结果表明,水库水质指标严重超标,水体已达不同程度富营养化水平^[3-4]。

表1 沂北地区水库群内各水库水文特征要素

水库名称	集水面积/ km ²	库容/ 万 m ³	径流深/ mm	换水率
石埠	78	2 127	269.2	0.79
贺庄	57	2 654	203.7	1.13
昌梨	35	2 111	252.8	0.40
羽山	7	1 225	252.8	0.13
横沟	42.2	2 459	252.8	0.40
房山	54.6	2 561	203.7	1.02

为了弄清水库群内生态环境状况,本研究分别在各水库的库尾、库中和坝前布设27个监测点:大石埠水库(DSB1-4)、贺庄水库(HZ1-3)、昌梨水库(CL1-2)、羽山水库(YS1-2)、横沟水库(HG1-4)和房山水库(FS1-3)。分别在枯水期(2021年3月早春季节第1次调查)和丰水期(2021年9月初秋季节第2次调查)对水库群内每个监测点各开展一次水质和浮游植物调查。

1.2 样本的采集与处理

使用竖式采水器定量采集1~2 L水样。采集浮游植物样品时,需根据采样点位的水深设置采样层次。水深小于2 m时,不分层,在表层下0.5 m采集;水深为2~5 m时,分别在表层下0.5 m、底层上0.5 m各采集1次;水深大于5 m时,则在表层下0.5 m处、中层以及底层上0.5 m处各采集1次。不同层次采集的样品作混合样处理。定量样品中加入1%~1.5%的鲁哥试液进行固定。藻类水华样品可根据情况酌情增加固定剂。

采用虹吸法进行前处理。在采样瓶中直接进行样品的沉淀、浓缩,因为一般浮游藻类的大小为几微米到几十微米,所以静置沉淀时间一般需要24 h。然后使用与虹吸管连接的尖头玻璃管以虹吸方式缓慢吸去上层的清液,不能搅动或吸出浮在表面和沉淀的藻类。最后留下约30~40 mL时,将沉淀物转移至容积为100 mL的样品瓶中,用吸出的上清液及蒸馏水冲洗采样瓶2~3次,冲洗液一起放入样品瓶中。

种类鉴定、计数。在生物显微镜下,将浮游藻类鉴定至种水平。种类鉴定参照《淡水微型生物图谱》^[5]和《中国淡水藻类—系统、分类及生态》^[6]。鉴定分析步骤如下:①计数前将样品充分摇匀,用移液枪吸取0.1 mL于浮游植物计数框中计算细胞数;②根据标签信息及其他信息确定样品的准确性;③定量计数在10×40倍视野下进行,并鉴定到种;④每个样本应重复计数2次,如2次误差小于10%则视为有效;若大于10%则进行第3次计数,取平均值。

1.3 水化学指标的测定

水化学指标测试参照《湖泊富营养化调查规范(第二版)》^[7],其中采用流动注射分析仪(SAN++, SKALAR, 荷兰)测定水中的TN、NO₃⁻、NH₄⁺、TP、PO₄³⁻,应用总有机碳分析仪(Multi N/C 2100, Jena, 德国)测定水中的总有机碳(TOC)。

1.4 浮游植物多样性指数

Shannon-Wiener 多样性指数反映群落结构的

复杂程度,其值越大群落越复杂,对环境的反馈功能越强,生态系统越稳定。浮游植物密度(N_i)、优势度(Y)、Shannon-Wiener 指数(H')^[8]的计算公式为

$$N_i = n \times \frac{A \times V_w}{A_c \times V} \quad (1)$$

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (2)$$

$$H' = \sum_{i=1}^S \left(\frac{n_i}{N} \right) \times \ln \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (3)$$

式中: n 为计数所得的浮游植物的个体数目; A 为计数框面积,mm²; A_c 为计数面积,mm²; V 为计数框的体积,mL; V_w 为1 L水样经沉淀浓缩后的体积,mL; f_i 为第*i*种浮游植物在所有样品中出现的频率。优势度 $Y > 0.02$ 的物种为优势种。 S 为样品物种数; n_i 为第*i*种生物的密度; N 为样品所有物种个数。 H' 数值越大,表示群落结构越复杂,群落越趋于稳定; $0 < H' < 1$,重污染; $H' = 1 \sim 3$,中污染; $H' > 3$,清洁。

2 结果与分析

2.1 浮游植物密度与生物量

3月和9月调查的水库群浮游植物密度均值分别为424.4万 cells/L和1 464.9万 cells/L。可见,高温的初秋季节浮游植物密度显著高于低温的早春季。每座水库浮游植物密度空间分布特征为,除贺庄水库外,2次调查中直接调引龙梁河的其余3座水库浮游植物密度库尾大于库首,2座由上游水库供水的水库藻密度库首大于库尾。这证明,上游来水对水库藻密度空间分布具有决定性影响。此外,2次调查显示羽山水库浮游植物密度均最大(图1)。

3月调查和9月调查的水库群浮游植物生物量均值分别为14.64 mg/L和5.63 mg/L。高温的初秋季节浮游植物密度显著小于低温的早春季。每座水库浮游植物密度空间分布无明显规律性。3月调查显示贺庄水库浮游植物生物量最大,9月调查显示横沟水库的浮游植物生物量最大。对比浮游植物密度和生物量调查结果可知,由于9月处于汛期,该时段内水库群所承担的防洪任务在下泄水量的同时,也造成了浮游植物生物量的损失,使得各水库浮游植物生物量较非汛期(3月)显著减少。此外,3月份贺庄水库浮游植物生物量出现58.54 mg/L的异常高值(图2),是其余5座水库均值10倍。

此外,水体交换率(水力停留时间)对水库富营养化和藻类水华具有重要影响^[9-10]。通过计算每座

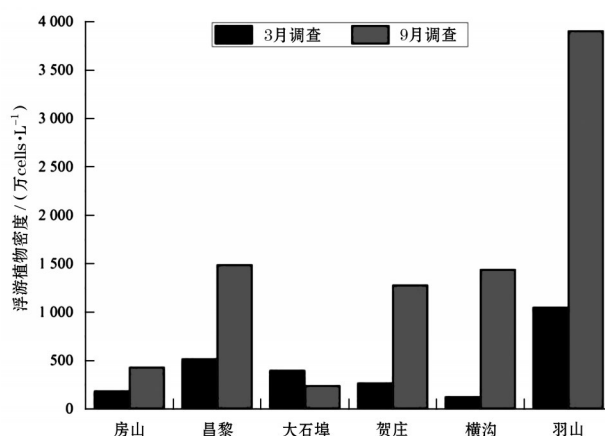


图1 沂北地区水库群内6座水库3月和9月浮游植物密度

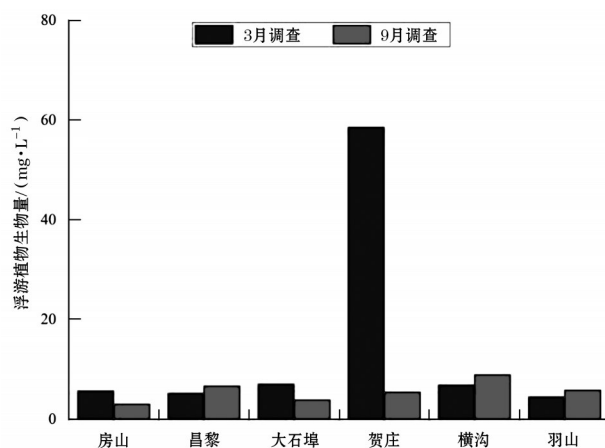


图2 沂北地区水库群内6座水库3月和9月浮游植物生物量

水库的浮游植物细胞平均体积与6座水库的换水率的相关关系表明两者具有显著相关关系(图3)。由此可知,随着水力停留时间的缩短,水库浮游植物

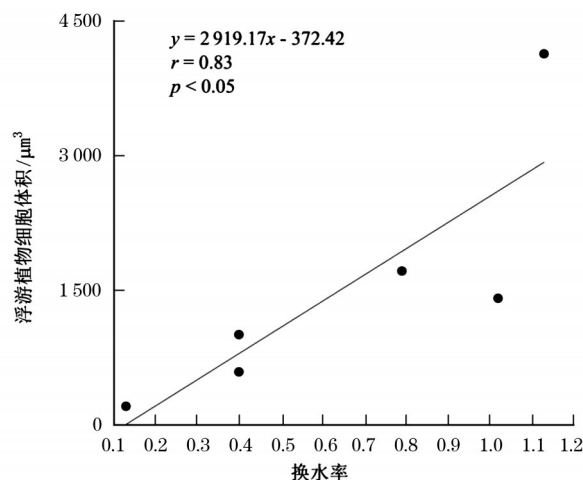


图3 沂北地区水库群6座水库换水率与平均浮游植物细胞体积关系

细胞的体积呈现增大的趋势。这可能是由于换水率大的水库营养盐补给更有保障,使得浮游植物群落向着大型化方向发展。

2.2 物种组成与优势种

3月调查结果(图4)表明,早春季节水库群浮游植物群落结构变化复杂。其中房山水库、昌黎水库、横沟水库和羽山水库的浮游植物数量最多的是蓝藻门,分别占总密度的47.15%、76.02%、35.11%和90.41%;大石埠水库的绿藻门浮游植物最多,占46.33%;贺庄水库的裸藻门浮游植物最多,占35.19%。从生物量最大占比来看,昌黎水库、横沟水库和羽山水库为硅藻门,房山水库为绿藻门,大石埠水库为蓝藻门,贺庄水库为裸藻门。

9月调查结果表明,初秋季水库群内6座水库浮

游植物数量最多的均为蓝藻,房山水库、昌黎水库、大石埠水库、贺庄水库、横沟水库和羽山水库的蓝藻门分别占总密度的83.5%、75.1%、69.6%、77.8%、42.7%和92.8%。从生物量最大占比来看,初秋季水库群内6座水库生物量占比最大的均为硅藻,占比依次为43.8%、50.9%、42.6%、45.1%、50.7%和46.2%。研究表明硅藻是水库中常见的灾害性水华物种。

水库群浮游植物优势度计算结果表明,3月房山水库、昌黎水库、羽山水库的第一优势种为浮游席藻(*Phormidium planctonica*);9月各水库浮游植物优势种均属于蓝藻门,共有5种,大石埠水库、贺庄水库、横沟水库的第一优势种为点形平裂藻(*Merismopedia punctata*),见表2。

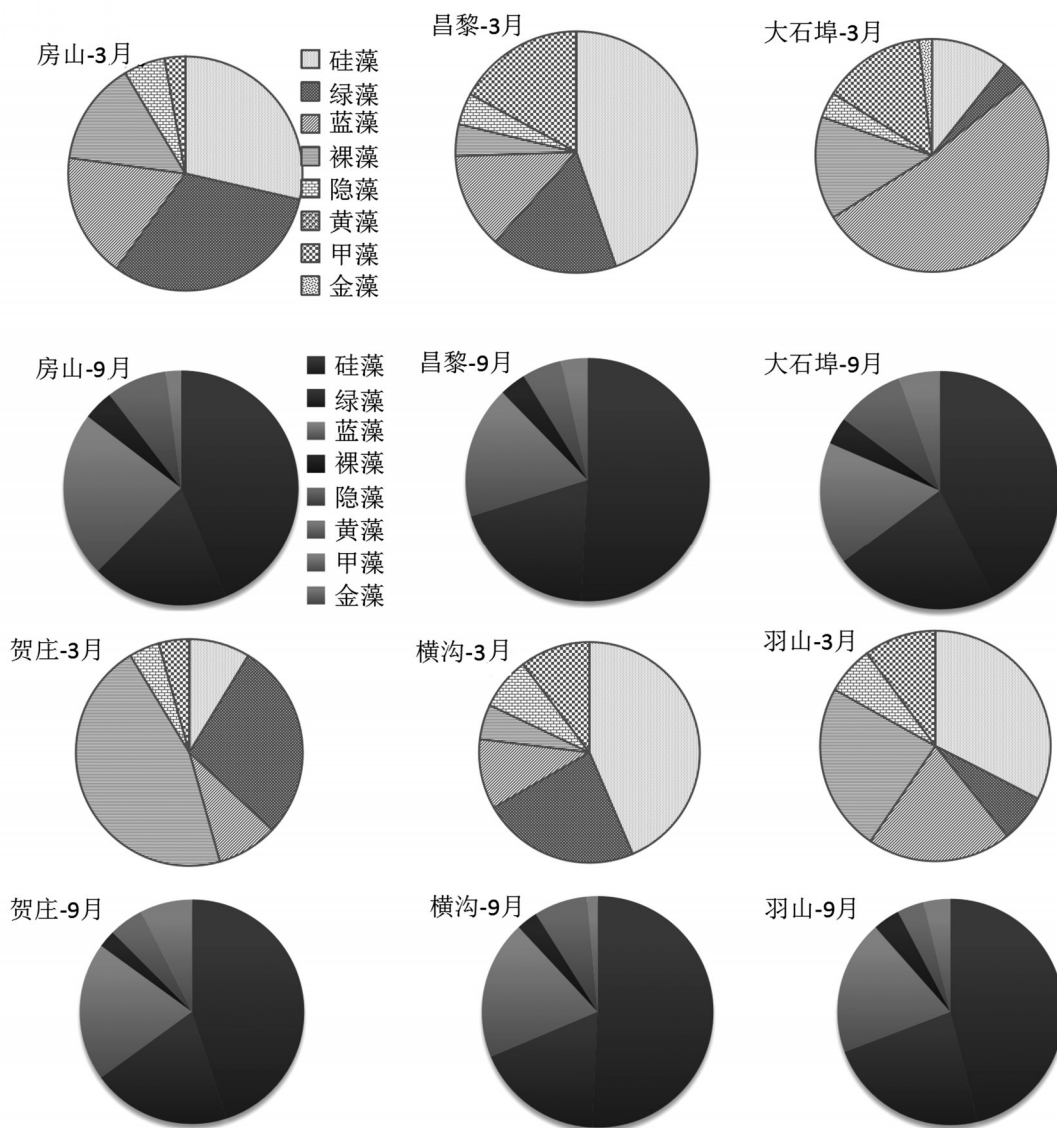


图4 沂北地区水库群6座水库3月和9月浮游植物生物量占比

表2 沂北地区水库群浮游植物优势种		
水库	优势种3月	优势种9月
房山	浮游席藻(<i>Phormidium planctonica</i>)、铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)	微小平裂藻(<i>Merismopedia minima</i>)、水华束丝藻(<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>)
昌黎	浮游席藻(<i>Phormidium planctonica</i>)、双点席藻(<i>Phormidium geminata</i>)	铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)、给水颤藻(<i>Oscillatoria irriguum</i>)
大石埠	河生集星藻(<i>Actinastrum fluviatile</i>)、浮游席藻(<i>Phormidium planctonica</i>)	点形平裂藻(<i>Merismopedia punctata</i>)、给水颤藻(<i>Oscillatoria irriguum</i>)
贺庄	旋纹裸藻(<i>Euglena spirogyra</i>)、铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)	点形平裂藻(<i>Merismopedia punctata</i>)、铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)
横沟	铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)、新星形冠盘藻(<i>Stephanodiscus neoastraea</i>)	点形平裂藻(<i>Merismopedia punctata</i>)、铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)
羽山	浮游席藻(<i>Phormidium planctonica</i>)、类颤鱼腥藻(<i>Anabaena oscillarioides</i>)	铜绿微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)、给水颤藻(<i>Oscillatoria irriguum</i>)

2.3 Shannon–Wiener 指数

3月水库群内6座水库浮游植物的*H'*均值排序为大石埠水库(2.58)>房山水库(2.5)>贺庄水库(2.3)>昌黎水库(2.26)>横沟水库(2.12)>羽山水库(1.41)。6座水库均处于中污染状态,羽山水库污染相对较重。从单个水库的*H'*分布来看,库首的*H'*值要普遍高于库尾(图5)。

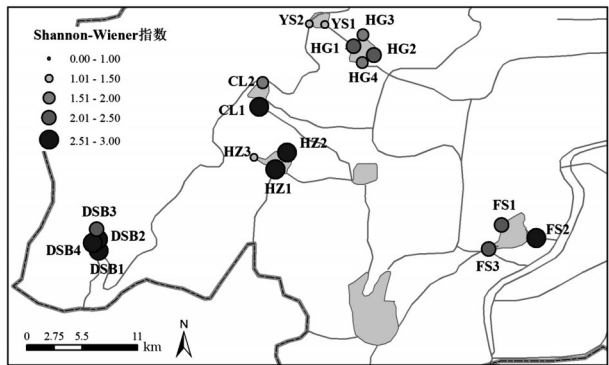


图5 沂北地区水库群3月浮游植物群落 Shannon–Wiener 指数

9月水库群内6座水库浮游植物的*H'*均值(1.99)低于3月。6座水库均处于中污染状态,羽山水库污染相对较重。从单个水库的*H'*分布来看,库首的*H'*值高于库尾的分布态势减弱(图6)。其中,由上游水库供水的横沟和房山水库甚至出现了库首*H'*值低于库尾的状况。这体现了汛期水库泄洪对浮游植物群落结构的影响。

此外,每座水库年度*H'*均值与换水率相关关系表明,两者具有非显著的正相关关系($r = 0.63, p >$

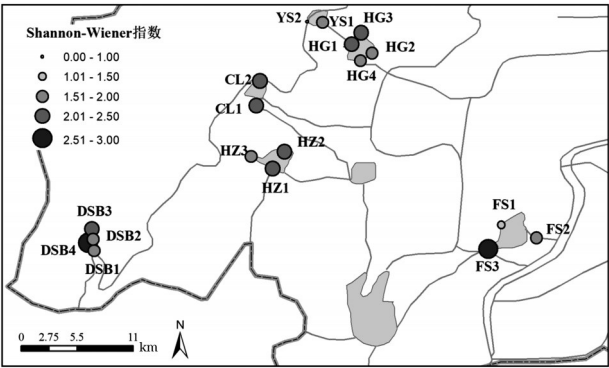


图6 沂北地区水库群9月浮游植物群落 Shannon–Wiener 指数

0.05)。这表明,随着水库水力停留时间的缩短,水库浮游植物多样性增大。

水库群内6座水库3月和9月浮游植物 Shannon–Wiener 指数与水化学指标相关性分析表明(表3),3月 Shannon–Wiener 指数和水化学指标无显著相关性;9月 Shannon–Wiener 指数和 COD_{Cr} 具有显著相关性($p < 0.05$),与其他指标无显著相关性。研究结果与临近的骆马湖等^[11–12]天然湖泊差别较大。这主要是因为水库是受人类活动深刻影响的水体^[13],其生态系统随着人类活动干扰(防汛调度、灌溉和养殖等)而不断变化,始终处于河流相和湖泊相生态系统的不断切换的过程中。

3 结 论

水库群浮游植物密度空间分布特征为受河流
(下转第16页)

华的目的。因此,建议在雨季,特别是大雨过后,增加水体氮磷等营养盐要素的监测工作,以辅助对蓝藻水华发生概率的研判工作。

(6)加强宣传。通过积极的宣传,使群众意识到水资源和水环境的重要,提高认识,自觉保护和珍惜水资源。

参考文献:

- [1] 陈小锋. 我国湖泊富营养化区域差异性调查及氮素循环研究[D]. 南京:南京大学,2012.

- [2] 李昂臻,陈思旭,李海燕,等. 北方谋省会城市主要水库富营养化程度、特征和防治对策[J]. 环境化学,2020,39(9):1-11.
- [3] 周坤朋,刘阳春,王崇臣. 北京什刹海区域富营养化时空演变特征分析[J]. 环境化学,2016,35(4):703-712.
- [4] 王亚平,黄廷林,周子振,等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价[J]. 环境化学,2017,36(3):660-665.
- [5] 吴涛,王建波,杨洁,等. 大黑汀水库水质时空变化特征及下游引水策略[J]. 水资源保护,2020,36(2):65-72.

(上接第5页)

表3 沂北地区水库群3月和9月 Shannon-Wiener 指数(H')与水化学指标相关分析

月份	NH ₃ -N	TOC	TN	COD _{cr}	TP
3月	-0.079	-0.221	-0.010	-0.012	0.107
9月	0.104	-0.039	0.244	-0.487*	0.101

注:*在0.05级别(双尾),相关性显著。

补给的水库的浮游植物密度库首小于库尾;受上游水库补给的水库浮游植物密度库首大于库尾。水库水量补给方式对其库区浮游植物密度空间分布具有决定性影响。

受水库防汛调度的影响,水库泄洪所造成的浮游植物生物量损失使得高温多雨的9月水库浮游植物生物量小于低温干旱的3月。同时,相关性分析表明:随着水力停留时间的缩短,水库浮游植物群落有向大型化发展的趋势。

沂北地区水库群内各水库的早春季浮游植物群落结构变化复杂,但是,初秋季浮游植物群落结构较为一致。各水库数量最多的是蓝藻,生物量占比最大的是硅藻。Shannon-Wiener 指数评价结果表明,水库群内所有水库均处中污染状态,其中羽山水库污染最严重。早春季水库 H' 值呈现库首高于库尾的分布特征,但是汛期水库调度破坏了这种空间分布规律。相关性分析表明:水库 H' 指数与化学需氧量呈显著正相关关系。

参考文献

- [1] 刘凌,朱良珍,叶键,等. 张福河浮游植物群落结构及生态位特征[J]. 水资源保护,2021,37(3):7-12.
- [2] 熊满堂,王普泽,叶少文,等. 丹江口水库浮游植物群落

- 时空特征及其鱼产力评估[J]. 中国水产科学,2021,28(6):13.
- [3] 彭晓丽. 连云港市4座水源水库富营养化评价及防治[J]. 江苏水利,2019(3):36-43.
- [4] 许传行. 东海县大石埠水库水生态修复措施探讨[J]. 安徽农学通报,2013,19(14):103-104.
- [5] 周凤霞. 淡水微生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [6] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [7] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 中国环境科学出版社,1990.
- [8] 燕文明,钱宝,杨婷婷,等. 平水期东洞庭湖主要入湖口藻类群落结构特征对环境因子的响应[J]. 水文,2020,40(1):6.
- [9] 赵孟绪,韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. 生态学报,2005,25(7):1554-1561.
- [10] 胥瑞晨,逢勇,胡祉冰,等. 太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性[J]. 水资源保护,2020,36(3):34-39.
- [11] 张庆吉,王业宇,王金东,等. 骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子[J]. 环境科学,2020,41(4):1648-1656.
- [12] 徐明,许静波,徐剑斌,等. 射阳湖浮游植物群落特征及其与环境因子相关性[J]. 江苏水利,2021(12):20-23.
- [13] 王婕,吴挺峰,丁艳青. 富春江水库变动回水区蓝藻水华成因初探[J]. 水电能源科学,2019,37(2):51-54.