

石梁河水库水质变化情势 及藻类水华风险分析

杨西月¹, 刘庆竹², 陆 隽¹, 高鸣远¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省水文水资源勘测局连云港分局, 江苏 连云港 222004)

摘要:通过分析近5年石梁河水库库区及入库河道(新沭河)水质变化情势和营养状态指数,发现氮、磷等营养盐质量浓度以及水温、水位是暴发蓝藻水华的关键驱动力,结合石梁河库区TN、TP现状质量浓度,提出夏季时期水温上升、水位下降会带来蓝藻水华暴发的潜在风险。

关键词: 水库水质; 富营养化; 蓝藻水华; 成因分析

中图分类号: X524

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)12-0001-0006

Analysis of water quality changes and algae bloom risk in Shilianghe Reservoir

YANG Xiyue¹, LIU Qingzhu², LU Jun¹, GAO Mingyuan¹

(1. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China;

2. Lianyungang Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau,
Lianyungang 222004, China)

Abstract: By analyzing the changes in water quality and nutritional status index of the Shiliang River reservoir area and the incoming river channel (Xinshu River) in the past 5 years, it was found that the quality concentration of nutrients such as nitrogen and phosphorus, as well as water temperature and level, are the key driving forces for the outbreak of cyanobacterial blooms. Combined with the current quality concentration of TN and TP in the Shiliang River reservoir area, it is proposed that the potential risk of cyanobacterial blooms will be brought about by the rise of water temperature and the decrease of water level in summer.

Key words: water quality of reservoir; eutrophication; cyanobacterial bloom; cause analysis

石梁河水库位于新沭河中游,地处江苏省东海县、赣榆区和山东省临沭县交界,是一座大型人工水库。该水库不仅能承接来自新沭河上游和沂河、沭河部分来水,也为连云港市供水安全提供重要保障。近年来,我省各湖库区有不同程度的蓝藻水华暴发,水生态状况备受关注。本文采取合理的水库水质评价方法和标准,分析石梁河水库近5年水质变化情势及富营养状况,总结蓝藻水华暴发成因,提出相关水库保护建议。

1 分析评价方法

本文数据来源为江苏省水环境监测中心2019—2023年水质监测成果。监测范围包括石梁河水库及入库河道(新沭河)。采用单因子评价法,水库主要评价项目含 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、TP和TN等,河流评价项目中,TN不参评。评价标准为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)(表1),将Ⅲ类水作为水质达标标准。

收稿日期: 2024-09-05

作者简介: 杨西月(1992—),女,工程师,硕士,主要从事水质评价、分析工作。E-mail: 974384066@qq.com

达标率 L 计算公式为

$$L = \frac{D}{J} \times 100\% \quad (1)$$

超标倍数 S 计算公式为

$$S = \frac{C - P}{P} \quad (2)$$

式中: D 为达标次数; J 为总监测次数; C 为该项实测值; P 为评价标准值。

表1 地表水环境质量标准基本项目标准限值

| 项目 | 单位:mg/L | | | |
|-------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| | $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$ | $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ | $\rho(\text{TP})$ | $\rho(\text{TN})$ |
| Ⅲ类水标准 | 6 | 1.0 | 0.2(湖、库0.05) | 1.0 |
| Ⅳ类水标准 | 10 | 1.5 | 0.3(湖、库0.10) | 1.5 |
| Ⅴ类水标准 | 15 | 2.0 | 0.4(湖、库0.02) | 2.0 |

湖库营养状态评价方法采用地表水资源质量评价技术规程(SL 395—2007),用0~100的连续数字对湖泊(水库)营养状态进行分级,评价标准见表2。

表2 湖泊(水库)营养状态评价标准

| 贫营养 | 中营养 | 富营养 $I > 50$ | | |
|--------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | | 轻度富营养 | 中度富营养 | 重度富营养 |
| $0 \leq I \leq 20$ | $20 < I \leq 50$ | $50 < I \leq 60$ | $60 < I \leq 80$ | $80 < I \leq 100$ |

2 水质现状

2.1 库内水质现状

根据2023年石梁河水库月均水质数据评价结

果,TN不参评,综合水质类别为Ⅲ~Ⅴ类;TN参评,综合水质类别为Ⅴ~劣Ⅴ类。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、TP和TN等主要水质指标情况如图1所示。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标较好,均达到Ⅱ类标准; COD_{Mn} 在Ⅱ~Ⅲ类间动态变化;TP质量浓度为Ⅲ~Ⅴ类;TN质量浓度为Ⅱ~劣Ⅴ类;后两者主要超Ⅲ类月份集中于下半年。

石梁河水库内水质现状情况如表3所示。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在0.23~0.44 mg/L范围内,年均值为0.30 mg/L,达标率为100%; COD_{Mn} 在3.2~5.2 mg/L之间,年均值为3.9 mg/L,达标率为100%;TP质量浓度范围为0.04~0.20 mg/L,年均值为0.08 mg/L,达标率为25.0%;TN质量浓度在0.37~4.01 mg/L范围间,年均值为1.66 mg/L,达标率为33.3%。其中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 峰值出现在2023年1月,分别为0.44 mg/L和5.2 mg/L;TP和TN质量浓度峰值出现在2023年6月,分别为0.2 mg/L和4.01 mg/L,后两者最大超标倍数均为3.0倍。

2.2 入库河道水质现状

根据2023年石梁河水库入库河流(新沭河)月均水质数据评价结果,综合水质类别为Ⅲ~Ⅴ类。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 和TP等主要水质指标情况如图2所示。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为Ⅱ~Ⅳ类,于6月超Ⅲ类水标准; COD_{Mn} 质量浓度为Ⅲ~Ⅳ类,超Ⅲ类月份集中在下半年;TP质量浓度为Ⅱ~Ⅴ类,于6—8月接近或超Ⅲ类水标准。

新沭河水质现状情况如表4所示。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在0.25~1.19 mg/L范围内,年均值为0.60 mg/L,

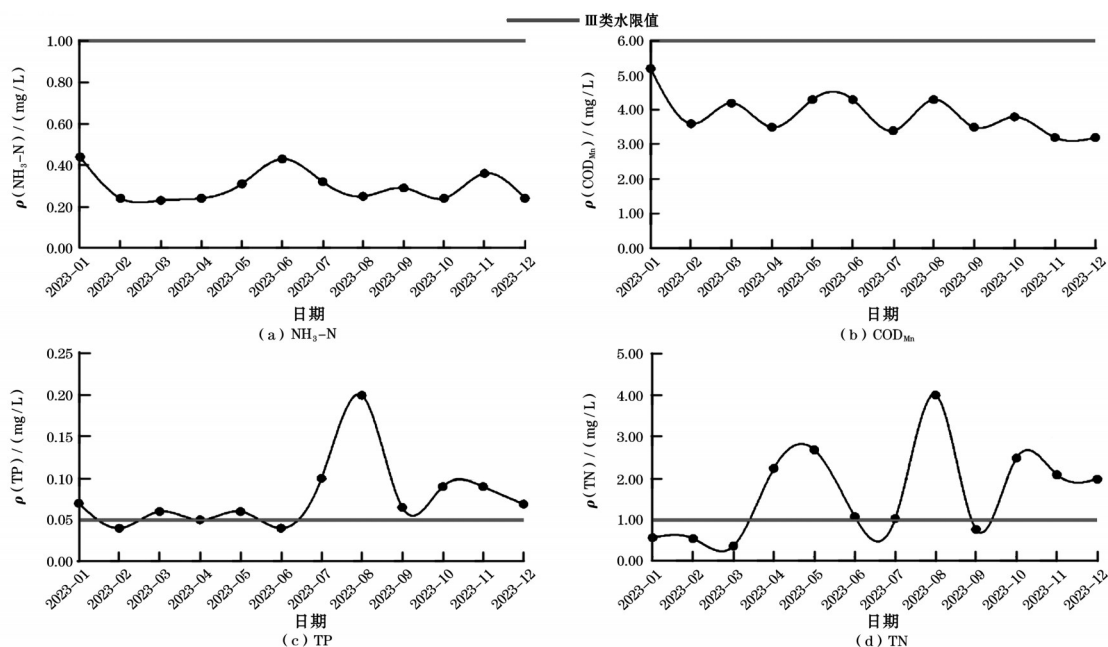


图1 2023年石梁河水库月均水质变化

表 3 2023 年石梁河水库月均水质监测数据分析

| 项目 | 监测质量浓度范围/(mg/L) | 平均监测质量浓度/(mg/L) | 最大超标倍数 | 达标率/% | 年均水质类别 |
|--------------------|-----------------|-----------------|--------|-------|--------|
| NH ₃ -N | 0.23~0.44 | 0.30 | | 100.0 | II |
| COD _{Mn} | 3.20~5.20 | 3.90 | | 100.0 | II |
| TP | 0.04~0.20 | 0.08 | 3.0 | 25.0 | IV |
| TN | 0.37~4.01 | 1.66 | 3.0 | 33.3 | V |

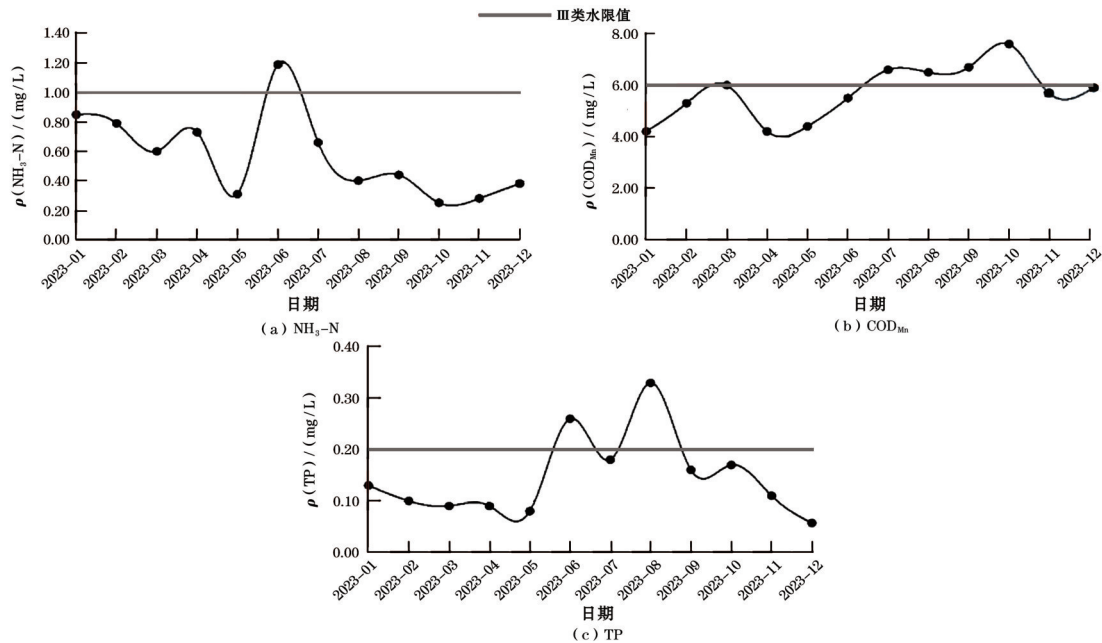


图 2 2023 年新沭河月均水质指标变化

表 4 2023 年新沭河月均水质监测数据分析

| 项目 | 监测质量浓度范围/(mg/L) | 平均监测质量浓度/(mg/L) | 最大超标倍数 | 达标率/% | 年均水质类别 |
|--------------------|-----------------|-----------------|--------|-------|--------|
| NH ₃ -N | 0.25~1.19 | 0.60 | 0.2 | 91.7 | III |
| COD _{Mn} | 4.20~7.60 | 5.70 | 0.3 | 66.7 | III |
| TP | 0.06~0.33 | 0.10 | 0.7 | 83.3 | III |

达标率为 91.7%,最大超标倍数为 0.2 倍;COD_{Mn} 在 4.2~7.6 mg/L 之间,年均值为 5.7 mg/L,达标率为 66.7%,最大超标倍数为 0.3 倍;TP 质量浓度范围为 0.06~0.33 mg/L,年均值为 0.1 mg/L,达标率为 83.3%,最大超标倍数为 0.7 倍。其中,NH₃-N 质量浓度的峰值出现在 2023 年 10 月,为 1.19 mg/L;COD_{Mn} 峰值出现在 2023 年 6 月,为 7.6 mg/L;TP 质量浓度峰值出现在 2023 年 8 月,高达 0.33 mg/L。

3 近 5 年水质变化情势

3.1 库区水质变化情势

根据 2019—2023 年石梁河水库的逐年年均水质数据评价结果,TN 不参评,综合水质类别为 IV~V 类;TN 参评,综合水质类别为 V~劣 V 类。NH₃-N、

COD_{Mn}、TP 和 TN 等主要水质指标情况如图 3 所示。NH₃-N 质量浓度总体较低,均为 II 类,年际间略有波动;COD_{Mn} 指标较好,为 II~III 类;TP 质量浓度为 IV~V 类,是除 TN 外的主要超标项目;TN 质量浓度均较高,为 V~劣 V 类。

其中,NH₃-N 质量浓度呈现动态变化,于 2019—2020 年间上升,于 2020 年达最高点后,2021 年降至近 5 年最低,后续又稳步提高;COD_{Mn} 在近 5 年间基本保持下降趋势,降幅为 15.2%;TP 和 TN 质量浓度在 2019—2020 年呈现上升趋势,并于 2020 年达到峰值后逐渐下降,TP 降幅为 9.3%,TN 降幅为 52.3%。总体来看,石梁河水库近 5 年来水质情况有所好转。

3.2 库区营养化程度变化情势

石梁河水库营养状态指数年际间变化情势如

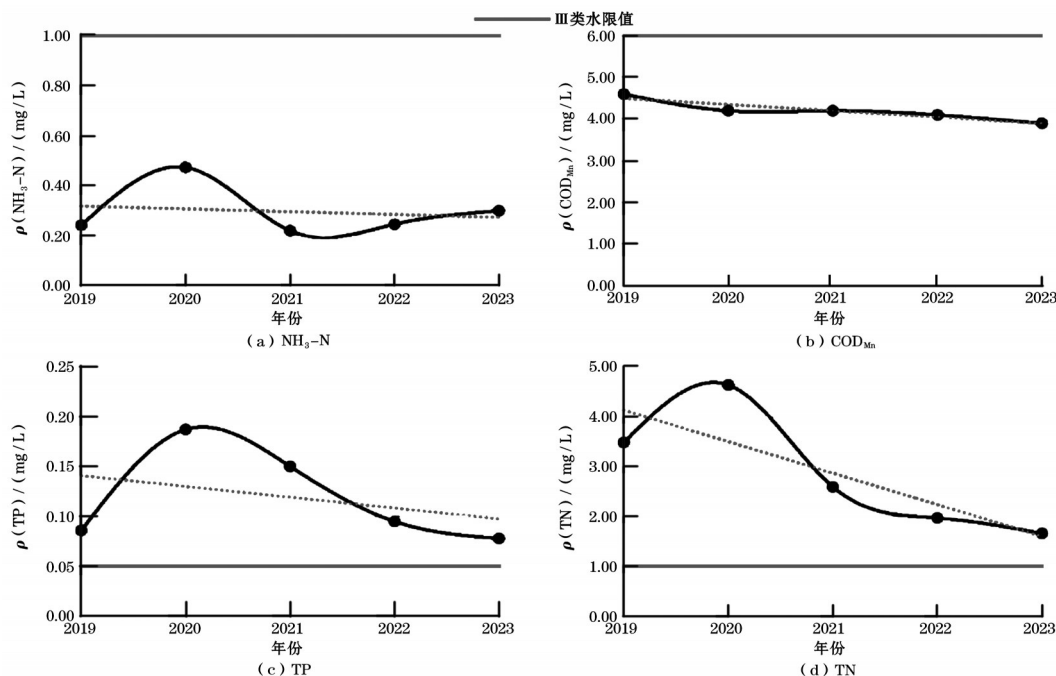


图3 2019—2023年石梁水库逐年年均水质指标变化

图4所示,2019—2023年营养状态指数介于56.5~61.0,在轻度富营养和中度富营养间变动。其中,2019—2020年指数呈现上升趋势,于2020年达峰值后,在2021—2023年总体呈现下降趋势,总降幅为4.1%。值得注意的是,除2020年为中度富营养外,其余年份均为轻度富营养。

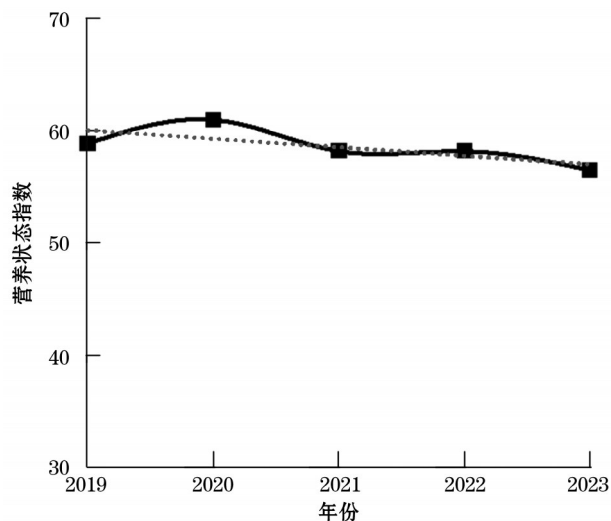


图4 2019—2023年石梁水库营养化指数年际变化

3.3 入库河道水质变化情势

根据石梁水库入库河流(新沭河)2019—2023年年均水质数据评价结果,综合水质类别为Ⅳ~Ⅴ类。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 和TP等主要水质指标情况如图5所示。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为Ⅱ~Ⅲ类,年际间略

有波动; COD_{Mn} 质量浓度为Ⅲ~Ⅳ类,总体呈下降趋势;TP质量浓度为Ⅲ~Ⅳ类,近3年均Ⅲ类。

其中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标近年来较为稳定,在2018—2020年上升后,又于2022年降至最低点,后续又继续上升; COD_{Mn} 呈现稳定的下降趋势,降幅为20.8%;TP指标除2020和2023年微幅上升外,其他年份均呈现较稳定的下降态势,总体降幅为33.6%。总体来看,新沭河水质于近5年呈现好转趋势。

4 蓝藻水华风险

水体富营养化是指氮、磷等营养元素超量进入水体中,促使藻类等水生生物迅速生长,导致水体的营养状态由贫转为富。在适宜条件下,蓝藻会在富营养化湖库中快速繁殖,当叶绿素a质量浓度超过 $10\text{ }\mu\text{g/L}$ 时,会形成蓝藻水华。蓝藻水华发生时,阳光因大面积藻体的聚集而无法射入深层水体,同时蓝藻死亡时会消耗水中氧气,造成水中溶解氧含量降低,破坏水生生物生存环境。除此外,部分蓝藻水华在生长过程中还能够分泌大量毒素,严重影响饮用水安全,威胁动物及人类生命健康,打破生态系统平衡。研究指出,引起蓝藻水华暴发的关键驱动因子包括氮、磷等营养盐质量浓度和水温^[1-3]。

4.1 营养盐质量浓度

氮、磷等营养盐质量浓度是引起蓝藻水华的直接成因。其中,磷被认为是藻类生长的限制因子,磷质量浓度升高促使蓝藻获得竞争优势,显著促

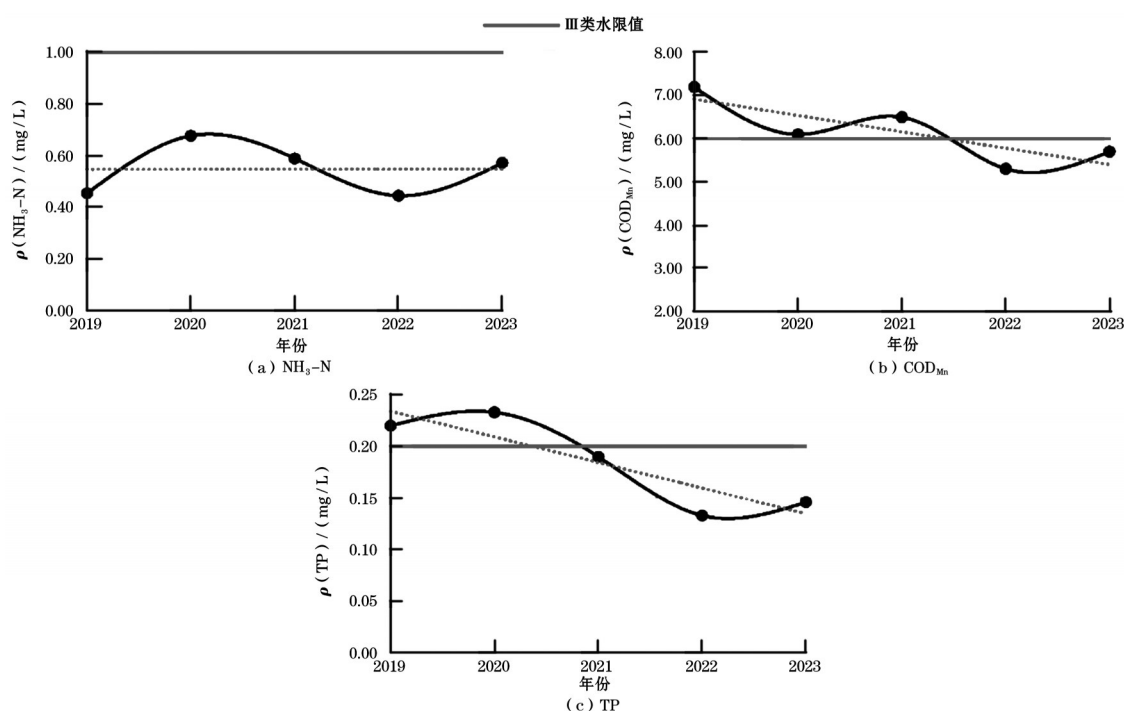


图5 2019—2023年新沭河逐年年均水质指标变化

进蓝藻水华发生。当磷源充足时,蓝藻生长也受到氮源限制。有研究表明,沉积物中积累的氮、磷等营养物质的释放为水体中藻类生长提供有效的营养来源。许慧萍等^[4]研究表明,太湖水华在 $\rho(\text{TN}) \leq 10 \text{ mg/L}$ 和 $\rho(\text{TP}) \leq 0.5 \text{ mg/L}$ 的营养盐条件下,水华群体细胞数随着营养盐质量浓度的增加而逐渐增大,并指出了磷是控制大部分藻类生长的主要因素。

石梁河水库营养状态指数与TN、TP的变化趋势如图6所示,TN、TP的质量浓度变化与营养状态指数呈现较为一致的变化趋势。其中,TN、TP的质量浓度于5月、8月和10月达到较高水平,此时营养状态指数也随之上升至55分以上。当TN、TP的质量浓度达到峰值时,水体呈现中度富营养状态。同时,水体营养状态指数受TN质量浓度的影响较高,这可能是磷源已达到满足藻类生长条件造成的。因此,这也证实了氮、磷元素引起水体富营养的关键驱动力之一。研究认为,当TN、TP质量浓度分别超过 0.2 mg/L 和 0.02 mg/L 时,湖库发生蓝藻水华的概率极大。然而,石梁河水库TN和TP现状质量浓度均高于上述临界质量浓度,满足蓝藻水华暴发所需的营养盐条件。

4.2 水温

蓝藻作为一类浮游植物,其生长与温度密切相关,因此水温也是引起蓝藻水华暴发的驱动因子之一。蓝藻生长的最适温度范围是 $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$,但它

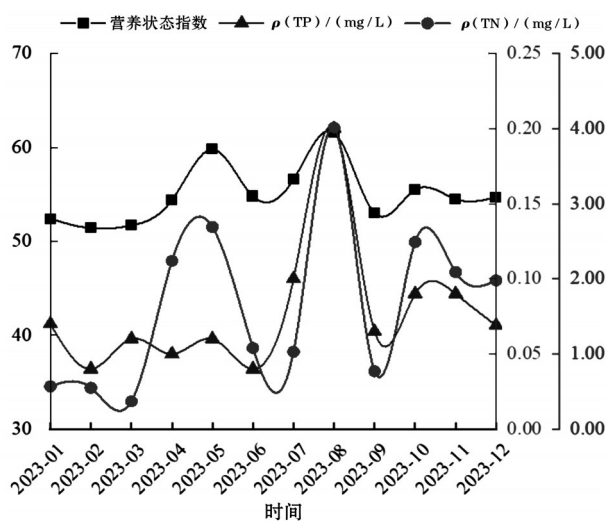


图6 2023年石梁河水库营养状态指数与TP、TN月均质量浓度变化

的高温耐受性要强于其他藻类,温度升高也会提高其竞争优势。Visser等^[6]指出蓝藻的最适生长温度为 $27 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$,且当气温超过 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,蓝藻生长的速率明显提高。

石梁河水库营养状态指数与水温变化情况如图7所示。由图7可知,2023年月均水温介于 $7.8 \sim 28.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,最高水温在7月($28.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)。其中,6—9月月均水温均在 $25 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 28.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,满足蓝藻生长的适宜水温,此时的营养状态指数也呈现较高的状态。因此,水温也是影响蓝藻生长的关键驱动力之一。

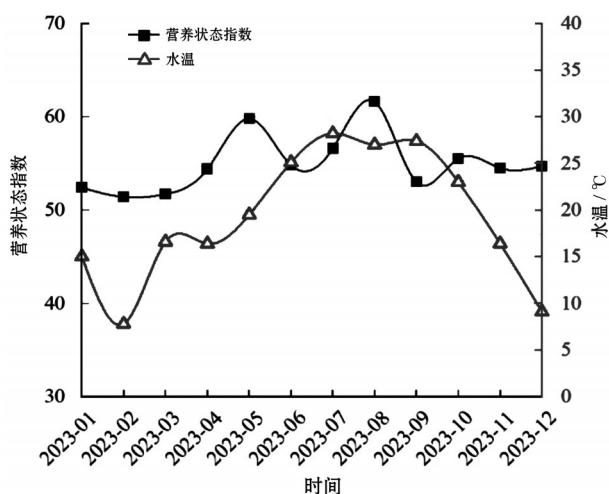


图7 2023年石梁河水库营养化指数与水温月均变化

4.3 水位

水库的营养化程度除了受营养盐、温度等因素有关,主要还受到水动力条件的影响。水动力条件包括流量、流速和水位。有研究表明,保持较低的滞留时间、较高的水位和底层较低的流速,都有利于减缓水体富营养化进程,浮游生物及藻类的现存量与水位存在显著的负相关性。

石梁河水库营养状态指数与水位变化情况如图8所示,7—8月月均水位明显低于其他月份,营养状态指数则处于较高水平;8月份水位最低,此时8月份的营养状态指数则达到全年最高值,水体呈现中度富营养状态。

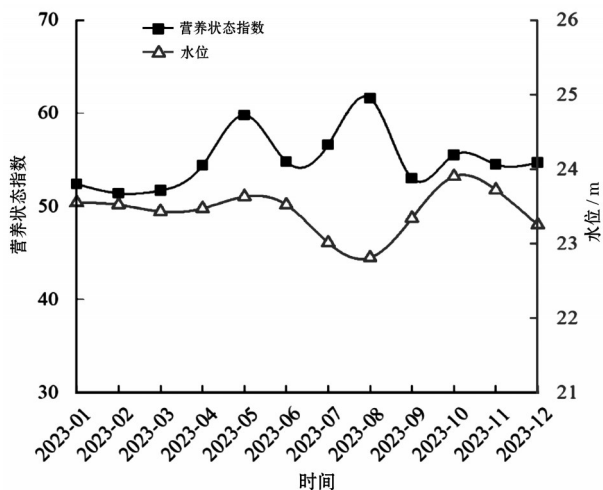


图8 2023年石梁河水库营养化指数与水位月均变化

综上所述,结合石梁河库区TP、TN现状质量浓度,夏季时期水温上升、水位降低时,库区营养状态指数处于较高水平,存在一定蓝藻水华暴发的风险,需严密关注、加强防范。

5 结论及建议

5.1 评价结论

(1)根据2023年石梁河水库月均水质数据评价,TN不参评,综合水质类别为Ⅲ~Ⅴ类;TN参评,综合水质类别为Ⅴ~劣Ⅴ类。2023年石梁河水库入库河流(新沭河)月均水质数据评价,综合水质类别为Ⅲ~Ⅴ类。

(2)根据2019—2023年石梁河水库的逐年年均水质数据评价,TN不参评,综合水质类别为Ⅳ~Ⅴ类;TN参评,综合水质类别为Ⅴ~劣Ⅴ类。2019—2023年新沭河年均水质类别评价为Ⅳ~Ⅴ类。

(3)氮、磷等营养盐质量浓度和较高水温为蓝藻水华的暴发提供了条件。对此,结合石梁河水库TN、TP现状质量浓度,当夏季高温导致水温上升时,需严密关注库区暴发大面积蓝藻水华的风险,提高应急应变能力。

5.2 保护建议

(1)物理调控。及时打捞蓝藻,尤其是在蓝藻快速增殖期,机械或人工打捞蓝藻并进行无害化处理或资源化利用;利用水体交换,优化水动力条件,减短营养盐滞留时间以抑制蓝藻生长。

(2)人工调控。减少农业面源污染,限制化肥使用,实施精准施肥,减少氮、磷流失;严格管控工业废水排放,确保污水处理达标后再排入水体;改善城市排水系统,减少生活污水直排,提高污水处理设施效能。

(3)生态调控。恢复库区周边植被,构建缓冲带,减少径流携带的营养盐输入;调整渔业结构,减少高营养负荷的养殖种类和密度;实施底泥疏浚,去除沉积物中的内源性营养物质。

参考文献:

- [1] 曹晶,袁静,赵丽,等. 湖库蓝藻水华控制技术发展和应用及展望[J]. 环境工程技术学报,2024,14(2):487-500.
- [2] 徐潇,张一新. 我国湖泊营养特性与蓝藻水华暴发机制[J]. 环境工程,2019,37(增刊1):49-53.
- [3] 杨柳燕,杨欣妍,任丽曼,等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. 湖泊科学,2019,31(1):18-27.
- [4] 许慧萍,杨桂军,周健,等. 氮、磷质量浓度对太湖水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)群体生长的影响[J]. 湖泊科学,2014,26(2):213-220.
- [5] VISSER M P, VERSPAGEN M J, SANDRINI G, et al. How rising CO₂ and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms[J]. Harmful Algae, 2016(54): 145-159.