

青蒿素缓释化感物质在富营养化湖泊中 抑藻效果与环境影响研究

马玉坤^{1,2}, 倪利晓^{1,2}, 杜存浩^{1,2}, 石佳惠^{1,2}, 张建华³, 张 祯⁴

(1. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029; 4. 江苏省洪泽湖水利工程管理处, 江苏 淮安 223001)

摘要:化感物质因其二次污染小且生态友好而具有很强的实际应用价值,本研究采用青蒿素缓释化感物质进行富营养化湖泊中蓝藻的原位治理。结果显示,青蒿素缓释化感物质在实际水体中具有长期的蓝藻抑制效果,叶绿素a、藻密度和蓝藻占比均保持较低水平。同时,青蒿素缓释化感物质的投加对水环境仅产生一定的初期影响,pH、总磷(TP)、总氮(TN)和总有机碳(TOC)等仅在投加的1~5 d逐渐升高,而后迅速降低。研究证实了青蒿素缓释化感物质的应用潜力和较小的环境影响。

关键词:化感物质; 蓝藻水华; 原位蓝藻抑制; 营养盐

中图分类号:X524

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2025)02-0006-0005

Research on the effect of artemisinin sustained-release allelochemicals on cyanobacteria inhibition and environmental impact in eutrophic lakes

MA Yushen^{1,2}, NI Lixiao^{1,2}, DU Cunhao^{1,2}, SHI Jiahui^{1,2},
ZHANG Jianhua³, ZHANG Zhen⁴

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;
4. Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China)

Abstract: Allelochemicals are of significant practical value due to their minimal secondary pollution and ecological friendliness. In this study, artemisinin sustained-release allelochemicals were used for in-situ control of cyanobacteria in eutrophic lakes. The results showed that artemisinin sustained-release allelochemicals exhibited long-term cyanobacterial inhibition in natural water bodies, maintaining low levels of chlorophyll-a, algal density, and cyanobacteria proportion. Meanwhile, the application of these allelochemicals had only a limited initial impact on the water environment, with pH, total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and total organic carbon (TOC) gradually increasing over the first 1–5 days, followed by a rapid decrease. The study confirmed the application potential of artemisinin sustained-release allelochemicals and their minimal environmental impact.

Key words: allelochemicals; cyanobacterial bloom; in-situ cyanobacterial inhibition; nutrient salt

收稿日期: 2024-09-13

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022063)

作者简介: 马玉坤(1997—),男,博士研究生,主要从事蓝藻治理及地球生物化学循环的研究。E-mail: 514970214@qq.com

通信作者: 倪利晓(1973—),女,教授,研究方向为水污染控制及水生态修复。E-mail: nilixiao@hhu.edu.cn

蓝藻水华已经成为了威胁全球水环境的重要问题之一^[1-3]。普遍的共识是,富营养化、全球升温 and 极端天气是蓝藻水华暴发的元凶,尤其是富营养化。目前的治理手段多从富营养化治理和污染负荷削减角度出发,通过限制水环境中的氮磷污染负荷来治理蓝藻^[4]。然而伴随着城市化、工业化进一步发展和全球气候变化,传统的流域治理方法已很难进一步削减污染负荷,同时气候变化导致了蓝藻水华呈现出影响范围扩大、持续时间延长的趋势,削弱了流域治理对蓝藻控制的成效^[5]。因此,亟待针对蓝藻水华暴发的新趋势开发新的原位治理方法以辅助流域治理和负荷削减。

当前,蓝藻原位治理的方法包括过氧化氢等氧化剂的化学氧化法、基于群体感应原理的群体感应猝灭法、溶藻菌生物治理法和化感物质抑制法等。过氧化氢等氧化剂的蓝藻氧化法虽然蓝藻抑制效果显著,但因其较强的氧化性,存在生态风险,且很难避免蓝藻的二次暴发^[6]。群体感应猝灭法和溶藻菌生物治理是新兴的蓝藻原位治理方法,但是研究仍停留于实验室阶段,其生态影响和实际效果仍需进一步评估。化感物质是陆生植物的次级代谢产物,具有生物活性的同时,也具有很好的可降解能力和生态安全性,已被证实具有很好的蓝藻抑制效果,具有很强的工程应用潜力^[7]。

本研究使用青蒿素缓释化感物质进行蓝藻原位治理。在夏季初期进行化感物质原位治理的对照试验,通过叶绿素a浓度、藻密度和蓝藻占比等评估蓝藻

原位治理效果,利用多种水体理化指标的长期变化情况评估青蒿素缓释化感物质的环境影响,旨在为青蒿素化感物质的工程应用和环境影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于江苏省南京市河海大学江宁校区内的东湖(31°54′59.03″N, 118°46′55.25″E)。东湖是封闭型景观湖泊,水量补给以降水和地表径流为主,水深2m左右。受富营养化影响,东湖在夏季会暴发蓝藻水华,优势种为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)。湖泊的监测数据见表1。

1.2 青蒿素缓释化感物质的制备

青蒿素缓释化感物质是通过离子交联法制备的^[8]。简而言之,第一步是将青蒿素(纯度98%,阿拉丁生化科技有限公司,上海)加入1 mg/mL的海藻酸钠溶液中,得到混合物。第二步是将混合物滴入含有1%(体积分数)壳聚糖(脱乙酰度≥95%,黏度100~200 MPa·s,阿拉丁生化技术有限公司,上海)和6 mg/mL CaCl₂(AR,国药集团化学试剂有限公司,上海)的酸性水溶液中。最后,将悬浮液离心(8 000 r/min, 30 min)、洗涤。根据先前的研究,青蒿素缓释化感物质的浓度设定为初始浓度的1/200,该浓度已通过微生态研究确定为最佳蓝藻抑制浓度。

1.3 试验设置

采用PVC防水材料制作的围隔进行原位蓝藻

表1 东湖的季节性水质指标

指标	春	夏	秋	冬
$\rho(\text{TP}) / (\text{mg/L})$	0.06 ± 0.00	0.68 ± 0.14	0.32 ± 0.03	0.17 ± 0.06
$\rho(\text{TN}) / (\text{mg/L})$	1.26 ± 0.08	9.07 ± 0.21	2.53 ± 0.01	3.11 ± 0.15
$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) / (\text{mg/L})$	0.10 ± 0.04	0.21 ± 0.01	0.42 ± 0.05	0.64 ± 0.16
$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) / (\text{mg/L})$	0.07 ± 0.00	0.27 ± 0.02	0.34 ± 0.01	0.33 ± 0.02
$\rho(\text{DOC}) / (\text{mg/L})$	3.80 ± 0.13	6.51 ± 0.55	8.99 ± 0.33	3.80 ± 0.13
$\rho(\text{TOC}) / (\text{mg/L})$	4.90 ± 0.18	19.09 ± 1.57	10.06 ± 0.20	4.90 ± 0.18
pH	8.32 ± 0.15	9.03 ± 0.01	7.73 ± 0.04	8.02 ± 0.03
氧还原电位 / mV	-158 ± 0.5	-117 ± 1.41	-32 ± 1.00	-35 ± 1.41
温度 / °C	24.50 ± 0.78	29.55 ± 0.07	23.00 ± 0.00	10.60 ± 0.57
藻类密度 / (10^4 cells/mL)	43.52 ± 13.61	89.57 ± 23.71	42.69 ± 12.12	12.71 ± 7.84
藻类密度(原生漂浮植物区) / (10^4 cells/mL)	41.83 ± 15.68	98.22 ± 29.41	38.79 ± 9.08	10.20 ± 4.68
蓝藻百分比 / %	87.61 ± 6.51	98.50 ± 1.42	88.63 ± 10.54	80.31 ± 7.82
$\rho(\text{Chl-a}) / (\mu\text{g/L})$	72.65 ± 35.78	401.24 ± 238.64	124.66 ± 69.21	38.65 ± 30.74

抑制实验。每个围隔 2.2 m 高,顶部有泡沫,底部有铁链配重,以确保围隔内外水力隔绝,围隔内仅与湖水共享气候条件。沿岸放置了 3 个围隔,形成 3 个封闭的水柱,其中包括 1 个对照组和 2 个试验组。对照组不投加青蒿素缓释化感物质;试验组设置 1 个平行并投加 1/200 的青蒿素缓释化感物质。原位试验从 2023 年 7 月 11 日开始,至 2023 年 10 月 31 日结束,周期为 110 d,详情见图 1。

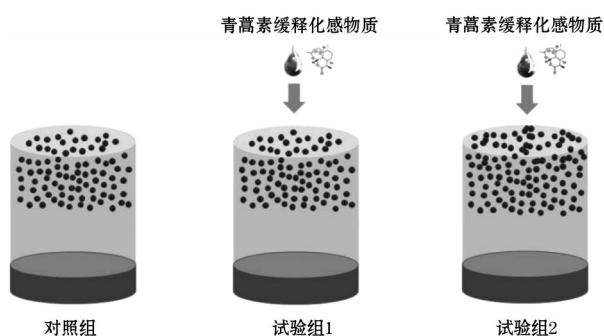


图 1 试验设置示意

1.4 指标测定与数据处理

使用便携式 pH 和 ORP 测量仪(SANXIN-SX711,

中国)测量氧化还原电位(ORP)、pH 值和水温(WT)。使用手持式藻类荧光仪(AuqaPen AP110, 捷克共和国)和血球计数法评估水体叶绿素 a(Chl-a)质量浓度、藻类密度(AD, 包括蓝藻和其他藻类)和蓝藻比例。总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)分别根据国家标准 HJ 636—2012、GB/T11893—1989、HJ 535—2009 和 HJ/T 346—2007 进行定量。对于需要紫外分光光度法的指标,采用紫外可见分光光度计(Metash UV-5100, 中国)进行测定。水体中的 TOC 和沉积物中的 TOC 使用总有机碳分析仪(Multi N/C 3100, Jena, 德国)测定。

所有数据图表均在 Excel 2019 及 OriginLab 2022 软件中处理绘制,采用 SPSS 23.0 对实验结果进行单因素方差分析、显著性分析($P < 0.05$)及主成分(PCA)分析。

2 结果与讨论

2.1 青蒿素缓释化感物质的原位蓝藻抑制效果

图 2 展示了原位蓝藻抑制过程中的蓝藻指标变化。从 Chl-a 来看,试验组的 Chl-a 始终维持在较低水平,为 $78.97 \pm 63.75 \mu\text{g/L}$ 。在第 10~50 d 期

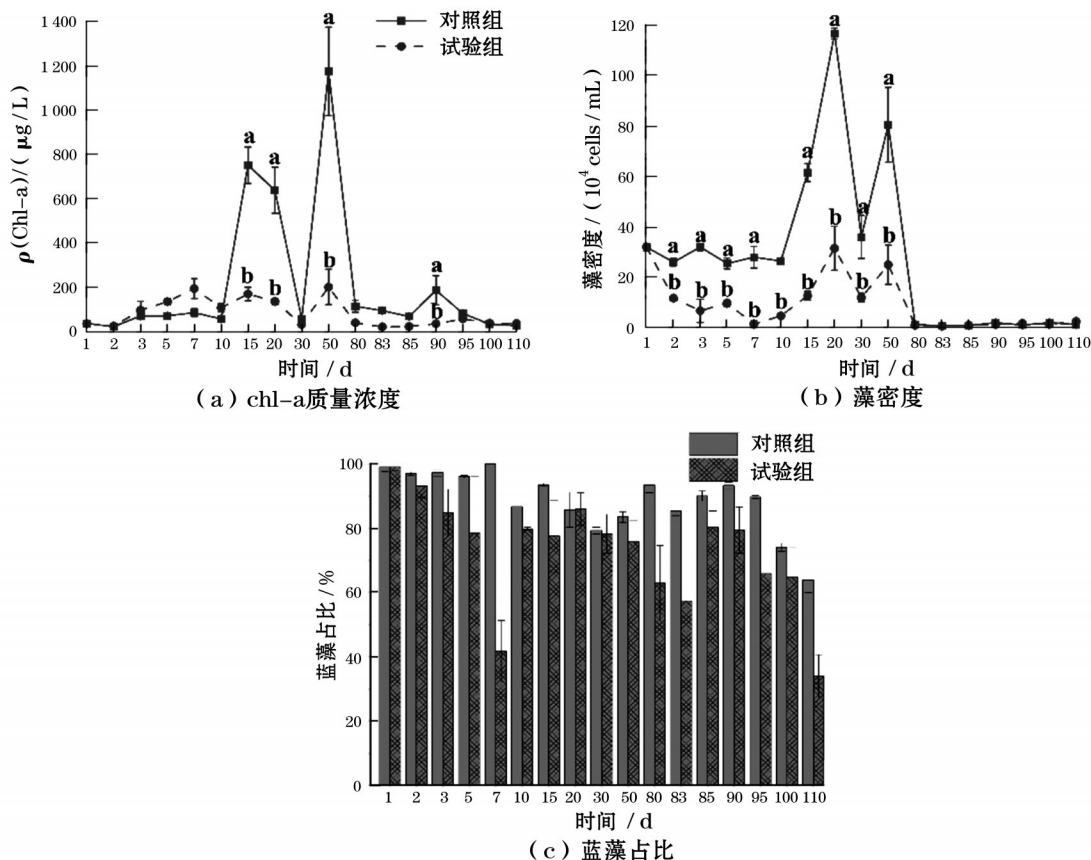


图 2 原位蓝藻抑制过程中的蓝藻指标变化

间,试验组并未像对照组那样出现水体 Chl-a 质量浓度的异常升高,未出现水华现象。藻密度的结果也支持这一结论,试验组在 1~30 d 的藻密度始终维持在 $13.64 \pm 10.91 \times 10^4$ cell/mL,显著低于对照组的 $42.67 \pm 29.85 \times 10^4$ cell/mL。结合 Chl-a 质量浓度和藻密度来看,试验组的藻密度显著降低,而 Chl-a 质量浓度并没有明显降低,这可能与蓝藻占比的变化有关。青蒿素缓释化感物质能够降低蓝藻占比,对蓝藻具有一定的特异性,试验组在 2~110 d 的蓝藻占比明显降低,取而代之的可能是其他真核藻类^[9]。真核藻类的藻细胞具有更强的光合效率和 Chl-a 质量浓度,可能导致了 Chl-a 质量浓度较小的变化。

2.2 原位蓝藻抑制过程中的沉积物影响

表层沉积物是湖泊固相与水相物质交换的重要载体,水相中的碳氮磷等营养盐浓度高,则向表层沉积物迁移,推动表层沉积物营养盐升高;在水相中的营养盐浓度降低后,表层沉积物中的弱结合态营养盐又再次释放,推动水相营养盐的升高,因此,沉积物污染情况能够显著地影响湖泊水质^[10]。从图 3 可知,青蒿素缓释化感物质在蓝藻抑制过程中,凋亡蓝藻细胞衍生的碳氮磷营养盐并没有显著影响沉积物,沉积物在试验全程与对照组相比并没有明显差异。这暗示了凋亡蓝藻衍生的营养

盐的转化和降解更多地发生在水柱中,而非沉降进入沉积物。

2.3 原位蓝藻抑制过程中的水环境影响

从图 4 可知,青蒿素缓释化感物质在蓝藻抑制过程中对 pH 和 ORP 的初期影响很大。试验组的 pH 在 2~7 d 时为 5.22 ± 1.65 ,显著低于对照组的 8.85 ± 0.63 。试验组的 ORP 在试验初期显著升高,为 9.58 ± 24.50 mV。试验组 pH 和 ORP 的初期强烈变化与青蒿素缓释化感物质的投加有关。青蒿素缓释化感物质虽然具有缓释特性,但其酸性特征和青蒿素较强的氧自由基的释放依然对水环境造成了一定的初期影响。但是,这种影响会迅速减弱,可能与微生物恢复、青蒿素消耗且浓度降低有关。

从图 5 可知,青蒿素缓释化感物质在蓝藻抑制过程中对水环境中的营养盐也具有很强的初期影响。TOC 和 TP 质量浓度在试验的 2~10 d 显著上升,分别为 109.37 ± 81.57 mg/L 和 1.31 ± 0.41 mg/L。TOC 质量浓度的显著升高与青蒿素缓释化感物质的高有机质浓度有关,而 TP 质量浓度的升高则与蓝藻凋亡有关。青蒿素缓释化感物质缓慢释放进入水体推动 TOC 质量浓度的逐渐升高,其产生的藻源性有机质和生物磷具有很强的生物可利用性,在微生

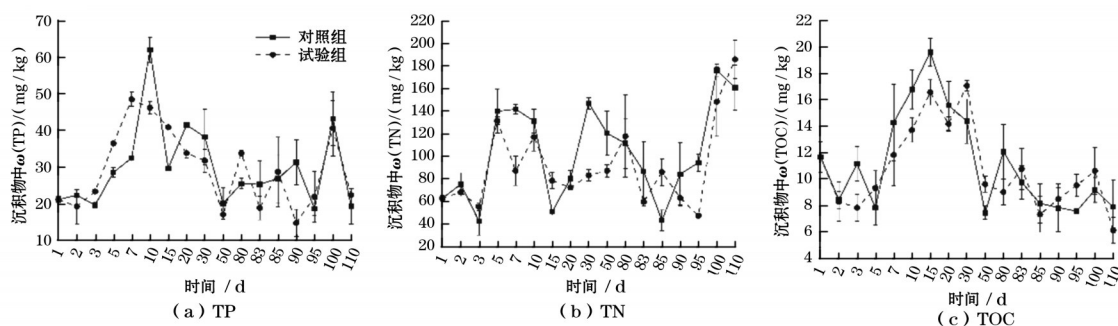


图3 沉积物营养盐变化

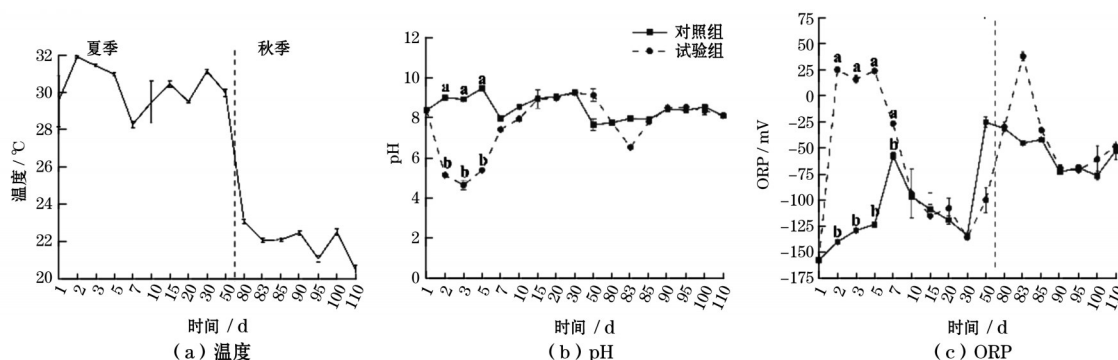


图4 水环境理化指标的变化

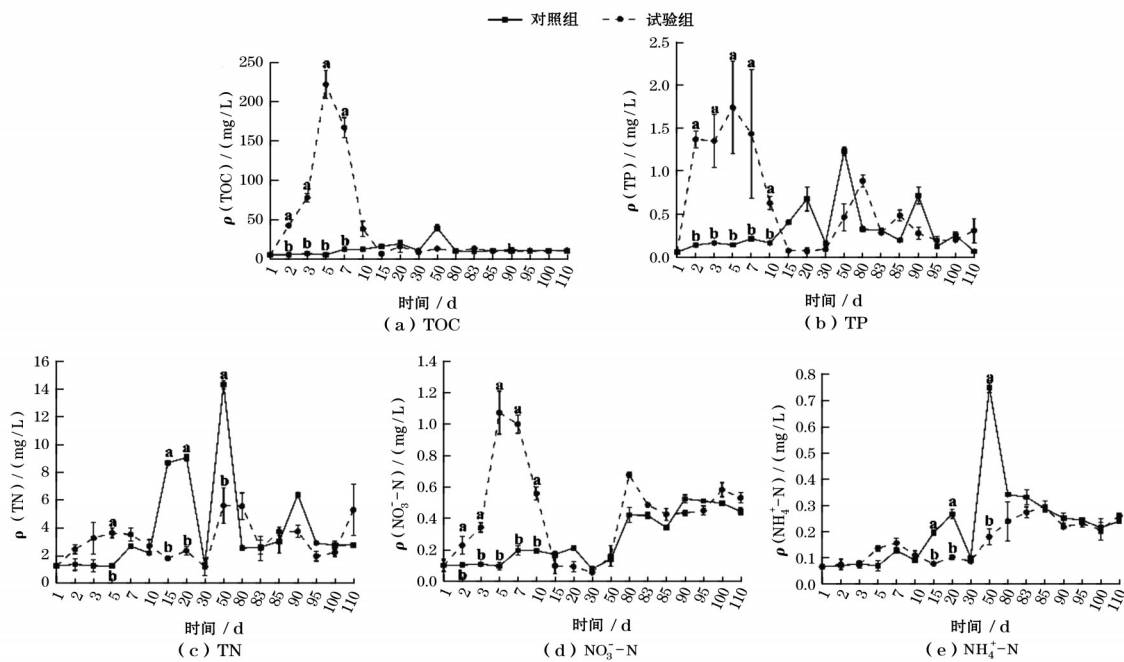


图5 水环境营养盐的变化

物降解作用下 TOC 和 TP 质量浓度又逐渐降低^[11]。TN 的影响主要体现在 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度的显著升高,在 2~10 d 为 $0.64 \pm 0.38 \text{ mg/L}$ 。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度的升高可能暗示了青蒿素缓释化感物质对微生物氮代谢进程以及蓝藻凋亡的影响,微生物的硝化作用和氮固定能力被加强,同时,蓝藻胞内 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 进入水体推动硝氮的升高;伴随着微生物对环境的适应,微生物反硝化和氨化能力提升, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度逐渐降低。

PCA 的结果基本符合上文中的推测。PC1 和 PC2 分别解释了 36.1% 和 29.3% 的环境因素的变化,AA 代表青蒿素缓释化感物质。试验组和对照组在 PCA 图 6 出现了明显的分区差异,试验组与 AA

显著相关,同时 AA 与 TP、ORP、TOC 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度的升高有关,与 pH 值的降低显著相关。藻密度、Chl-a 质量浓度一定程度上受到了 AA 的负面影响而降低。

3 结 语

本研究探究了青蒿素缓释化感物质在实际水体中的蓝藻原位治理效果,并评估其对水环境的影响。结果发现,青蒿素缓释化感物质在实际水环境中具有很好的蓝藻抑制效果,能发挥长期的蓝藻抑制作用。同时,蓝藻原位治理过程中,青蒿素缓释化感物质仅初期对水环境有一定的影响,在微生物恢复和降解作用下,环境影响在 10 d 后几乎被完全削弱;蓝藻凋亡衍生的碳氮磷营养盐的转化和降解主要发生在水柱中,对沉积物几乎没有影响。

因此,青蒿素缓释化感物质具有很好的生态安全性和实际应用价值,可以成为蓝藻水华原位治理的有效手段,研究为青蒿素缓释化感物质的蓝藻原位治理和应用提供了数据支撑和技术参考。

参考文献:

- [1] PAERL H W, OTTEN T G, KUDELA R. Mitigating the expansion of harmful algal blooms across the freshwater-to-marine continuum [J]. Environ Sci Technol, 2018, 52 (10): 5519-5529.

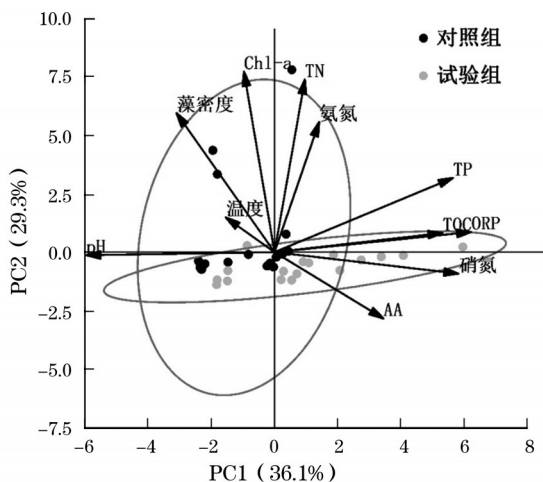


图6 基于PCA的水环境指标间的关系

(下转第17页)

参考文献:

- [1] 刘艺平,袁素勤,卫仁娟,等. 竖井式贯流泵进出水流动优化CFD仿真计算[J]. 四川水利,2024,45(1):13-19,31.
- [2] 张仁田,朱红耕,卜舸,等. 南水北调东线一期工程灯泡贯流泵性能分析[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(1):32-41.
- [3] 邵园园,薛海朋,吴皓明,等. 贯流泵压力脉动特性及叶片结构性能分析[J]. 江苏水利,2024(2):17-21,26.
- [4] 徐磊,李非凡,孙世宏,等. 前置竖井贯流泵出水流动设计参数对其水力性能的影响[J]. 灌溉排水学报,2021,40(11):73-78,97.
- [5] 李凌昊. 潜水贯流泵灯泡体结构优化及水动力特性研究[D]. 扬州:扬州大学,2022.
- [6] 阮黎,于定勇,李现琦,等. 振荡流下二维单椭圆柱体水动力特性研究[J]. 水动力学研究与进展A辑,2024,39(3):425-433.
- [7] 杨晓春. CFD在大型潜水贯流泵装置选型设计中的应用[J]. 江淮水利科技,2024(4):41-45,58.
- [8] 张辉,陈红勋,马峥. 灯泡贯流泵装置水力模型设计研究[J]. 水动力学研究与进展A辑,2023,38(6):926-933.
- [9] 陈群. 对流传递过程的不可逆性及其优化[D]. 北京:清华大学,2008.
- [10] 程雪涛,梁新刚. 熵产最小化理论在传热和热功转换优化中的应用探讨[J]. 物理学报,2016,65(18):239-245.
- [11] 金燕,刘超,汤方平. 灯泡贯流泵装置内部流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(2):155-159.
- [12] 张睿,谭舒翊,丁旭洁,等. 基于熵产理论的竖井贯流泵流动损失特性[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):6-12.
- [13] 潘强,孙龙月,丁威,等. 灯泡贯流泵局部熵产与能量损失特性研究[J]. 西安交通大学学报,2023,57(1):131-140.
- [14] HERWIG H, KOCK F. Direct and indirect methods of calculating entropy generation rates in turbulent convective heat transfer problems [J]. Heat Mass Transfer, 2007, 43(3):207-215.
- [15] KOCK F, HERWIG H. Local entropy production in turbulent shear flows: a high-Reynolds number model with wall functions [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2004, 47(10): 2205-2215.
- [16] 孙龙刚,郭鹏程,罗兴铨. 基于不同涡识别准则的水轮机尾水管涡带形态识别研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2019,34(6):779-787.
- (上接第10页)
- [2] 吴娟,朱跃龙,金松,等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):542-551.
- [3] 王寿兵,隗琪,陈浩,等. 水体高pH值对滇池生态修复的潜在影响[J]. 水资源保护,2023,39(4):26-31.
- [4] 温舒珂,彭凯,龚志军,等. 近40年来太湖梅梁湾底栖动物群落演变特征及驱动因素[J]. 湖泊科学,2023,35(2):599-611.
- [5] WANG Y, FENG L, HOU X. Algal blooms in lakes in China over the past two decades: patterns, trends, and drivers [J]. Water Resource Research, 2023, 59(10): e2022WR033340.
- [6] LUO C, CHEN C, XIAN X, et al. The secondary outbreak risk and mechanisms of *Microcystis aeruginosa* after H_2O_2 treatment [J]. J Hazard Mater, 2024(470): 134196.
- [7] 焦岗伟,赵倩名,何培民,等. 基于化感原理的复合抑制剂研究进展[J]. 环境污染与防治,2023,45(9):1287-1293.
- [8] 王佳佳,倪利晓,蒋志云,等. 盐度对化感物质青蒿素胁迫下铜绿微囊藻生长及叶绿素荧光的影响[J]. 环境工程,2023,41(1):35-41.
- [9] 张铮惠,李霞,张建华,等. 青蒿素缓释微粒对铜绿微囊藻的抑制机理研究[J]. 环境科技,2023,36(3):30-34,41.
- [10] 刘笑天. 渤海和黄海水-沉积物体系磷的形态、转化和沉积过程[D]. 青岛:自然资源部第一海洋研究所,2023.
- [11] 倪茂飞,周慧,马永梅,等. 典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析[J]. 环境科学,2022,43(7):3552-3561.