

柴汶河硅藻水华氮磷驱动特征、空间分异与分区治理研究

吴春辉², 刘新昊¹, 朱健¹, 刘轲¹, 张立志¹, 崔元杰¹, 王德君¹, 钟宛真^{1*}, 刘罗林^{3*}

1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271017
2. 东平县生态环境监控和排放总量控制中心, 山东 泰安 271500
3. 江西省地质局第八地质大队, 江西 上饶 334001

摘要: 为服务黄河流域生态保护重大战略, 针对氮磷污染引发的支流水生态风险, 该研究以黄河下游典型支流柴汶河为对象, 通过2023-2024年主河道7个断面的月度监测, 结合浮游植物群落鉴定与水质参数分析, 揭示柴汶河存在“氮主导-磷限制”营养格局: 藻密度与总氮呈弱相关($r=0.420, P<0.001$), 与总磷负相关($r=-0.289$), 枯水期硅藻水华达中度水平(峰值 3.74×10^7 cells/L, 小环藻占比95.13%); 氮磷营养盐时空差异显著: 总氮(2.7–39.5 mg/L)在冬季及下游浓度最高, 主要受污水排放及藻类代谢影响; 总磷(0.01–1.3 mg/L)于中上游及春夏季节偏高, 主要与养殖排污相关; 氨氮(CW3峰值3.6 mg/L)和硝态氮(CW7峰值11.57 mg/L)分别受农业工业排污及地下水补给驱动。据此提出“分区-分级-协同”治理路径, 辅以枯水期跨区生态补水, 为山东省“十四五”流域考核达标及黄河支流精准治污提供技术范式。

关键词: 黄河流域; 柴汶河; 硅藻藻华; 小环藻; 氮磷营养盐

中图法分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)05-0880-10

Nitrogen and Phosphorus Driving Characteristics, Spatial Differentiation and Zoning Governance of Diatom Blooms in the Chaiwen River

WU Chun-hui², LIU Xin-hao¹, ZHU Jian¹, LIU Ke¹, ZHANG Li-zhi¹, CUI Yuan-jie¹, WANG De-jun¹, ZHONG Wan-zhen^{1*}, LIU Luo-lin^{3*}

1. College of Resources and Environment/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
2. Dongping County Environmental Monitoring and Total Emission Control Center, Tai'an 271500, China
3. The Eighth Geology Team of the Jiangxi Provincial Geology Bureau, Shangrao 334001, China

Abstract: To serve the major strategy of ecological protection in the Yellow River Basin, and aiming at the aquatic ecological risks in tributaries caused by nitrogen and phosphorus pollution, this study takes the Chaiwen River, a typical tributary in the lower reaches of the Yellow River, as the research object. Through monthly monitoring of 7 sections in the main river channel from 2023 to 2024, combined with phytoplankton community identification and water quality parameter analysis, it reveals that the Chaiwen River exhibits a "nitrogen-dominated and phosphorus-limited" nutrient pattern: Algal density is weakly correlated with total nitrogen ($r=0.420, P<0.001$), and negatively correlated with total phosphorus ($r=-0.289$). During the dry season, diatom blooms reach a moderate level (peak value of 3.74×10^7 cells/L, with *Cyclotella* accounting for 95.13%). The spatiotemporal differences in nitrogen and phosphorus nutrients are significant: Total nitrogen (2.7–39.5 mg/L) is the highest in winter and downstream, mainly influenced by sewage discharge and algal metabolism; total phosphorus (0.01–1.3 mg/L) is relatively high in the middle and upper reaches as well as in spring and summer, mainly due to aquaculture wastewater discharge; ammonia nitrogen (peak value of 3.6 mg/L at CW3) and nitrate nitrogen (peak value of 11.57 mg/L at CW7) are driven by agricultural and industrial wastewater discharge and groundwater recharge, respectively. Based on these findings, a "zoning-grading-coordination" governance approach is proposed, supplemented by cross-regional ecological water replenishment during the dry season. This provides a technical paradigm for meeting the basin assessment targets during Shandong Province's 14th Five-Year Plan period and for implementing targeted pollution control in the Yellow River tributaries.

Keywords: Yellow River Basin; Chaiwen River; diatom algal bloom; *cyclotella*; nitrogen and phosphorus nutrients

在水生生态系统中, 硅藻是不可或缺的一部分, 对维持水域的生态平衡和水质状况起到了重

要的指示作用, 在河流和湖泊的水环境监测及生态健康评估至关重要^[1-3]。几十年来, 由于愈加

收稿日期: 2024-06-12

修回日期: 2025-08-29

第1作者简介: 吴春辉(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 水生态环境调查研究。E-mail: wchbj@163.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: Zhongjiajiaa11@outlook.com; liuluolin1998@163.com

强烈的人类活动和气候变化,全球河流爆发了大规模硅藻水华,例如2019年夏季上升流事件导致的贝加尔湖硅藻生物量的异常升高(峰值达 2.8×10^6 cells/L),底层硅藻细胞(以 *Cyclotella baicalensis* 为主)通过垂直输运进入透光层,结合表层水温分层弱化,形成短暂性水华^[4];硅酸盐与磷酸盐的自然富集叠加人为氮输入,触发印度 Amba 河硅藻爆发性增殖,其营养盐阈值比显著偏离 Redfield 比值^[5];2015年春季英国泰晤士河持续13周的水华则是由水文气象条件驱动引发的,太阳辐射强度 >350 W/m²、水温梯度突破9 °C临界值及流量限制(20-30 m³/s),导致硅藻比生长率 $\mu > 0.4$ d⁻¹^[6]。相比于相对静止的水体(湖泊和水库),河流藻类的大量繁殖规模更大,对水生生态系统和人类健康造成更严重的后果。

氮磷营养盐是生态系统中不可或缺的角色,在维持生命活动方面也起到至关重要的作用,但是,当水体中的氮磷营养盐过量时,会引发一系列生态问题。其中,氮磷营养盐过量输入是导致水体富营养化和藻类水华的主要原因^[7]。柴汶河位于中国山东省中部,是黄河下游最大支流大汶河的重要支流,发源于泰安市新泰市南部山区,流经新泰、宁阳等地,最终在泰安市岱岳区汇入汶河。河流全长约100 km,流域面积约1600 km²,属季节性河流,夏季水量充沛,冬季相对较少。柴汶河沿岸土地肥沃,是重要的农业灌溉水源,支撑着沿岸的农业生产和居民生活。同时,河流也承载着一定的生态功能,是当地生物多样性的重要组成部分。近年来,柴汶河流域由于由氮磷营养盐造成的富营养化问题十分严峻,主要是由流域周边的各类城镇建设以及农业活动造成的^[8]。

结合《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要(2023-2035年)》对氮磷污染控制的刚性要求(第二章第三节),以及山东省“四减四增”行动方案中工业排污总量削减目标(鲁政发(2023)12号),柴汶河作为黄河下游关键支流,其富营养化治理已成为区域生态安全的紧迫任务^[9]。因此研究柴汶河流域氮磷营养盐变化规律,探究由过量的氮磷营养盐引起的河流藻类水华中藻类构成和占比,为流域内藻类管理和治理提供理论依据,提升柴汶河水水质等级从

而达到环境局工作要求,保障柴汶河内的国控断面稳定达标,为柴汶河流域水体整体改善提供有力的帮助。

1 材料与方法

1.1 研究点位概况

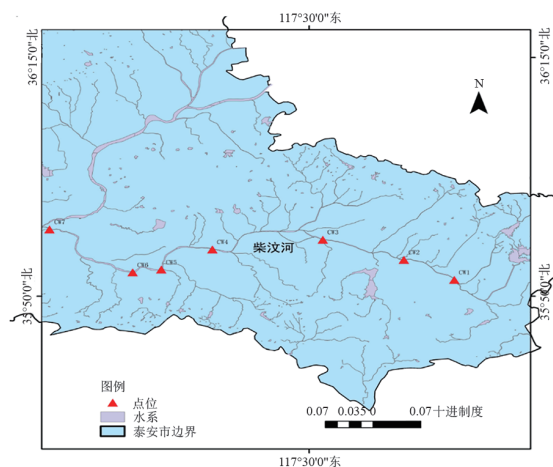


图1 柴汶河流域图

Fig. 1 Map of the Chaiwen River Basin

研究区位于中国东部山东省泰安市,处于北纬35°37'~36°07'、东经117°16'~118°之间的柴汶河。

1.2 样品采集与处理

研究时间为2023年3月~2024年2月,每月采样1次,其中2023年6月因汶河上游污水厂管道泄露,对水质产生影响,故未采样。为全面把握该河流水质的变化态势,依据科学原则设置了7个采样点,自上而下为凤凰泉村(CW1)、郭家泉村(CW2)、谷里大桥(CW3)、城东大桥(CW4)、水发大坝(CW5)、北石固桥(CW6)、西高村桥(CW7)对应的采样点。

1.3 浮游植物定性与定量分析

浮游植物物种组成与丰度,通过1 L有机玻璃垂向直立式采水器法采集水面以下0.5 m左右的表层样。浮游植物测定采用《水生态检测技术要求-淡水浮游植物(试行)》在实验室进行,浮游植物定性分析用Zeiss Axiovert 5型显微镜于400倍下进行鉴定。浮游植物的分类鉴定主要参考藻类相关分类鉴定资料。

1.4 理化指标测定方法

采样工作严格依照参考《地表水环境质量监

测技术规范》(HJ/T91.2-2022)、《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)的规范要求落实,每月按照固定时间采集水样,实验数据指标囊括总氮、总磷、氨氮、硝酸盐氮。总氮、总磷、氨氮与硝酸盐氮测定均使用山东格林凯瑞多参数水质测定仪(GL-660)、多参数水质分析仪(GL-200)通过快速测定法进行测定。叶绿素 a 浓度通过采用丙酮-分光光度法测定。

1.5 理化指标测定

所有理化指标均测定三组平行样本,利用

SPSS 27 进行试验数据的统计分析,使用 origin 软件进行皮尔森和斯皮尔曼分析与绘图。

2 结果及数据分析

2.1 数据分析

2.1.1 浮游植物种类组成 如图2所示,本研究共鉴定出7门72属151种浮游植物,分别为绿藻门31属66种、硅藻门19属39种、蓝藻门11属19种、裸藻门6属19种、隐藻门2属4种、甲藻门2属3种、金藻门1属1种。

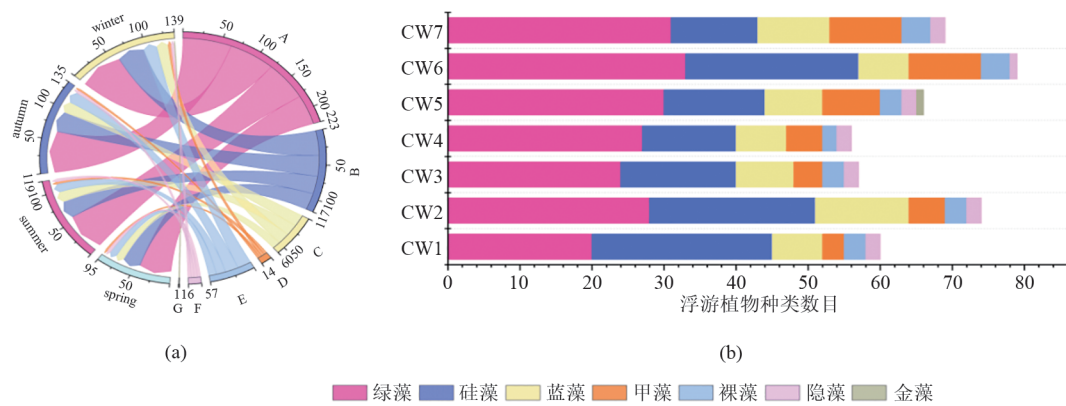


图2 不同季节浮游植物种类的相对丰度,不同断面浮游植物种类的数量

Fig. 2 Relative abundance of phytoplankton species in different seasons, and the number of phytoplankton species in different sections

时间尺度上,冬季物种总数最多,绿藻门物种数在总量中占比自夏季单调减少,在冬季达到最大;硅藻门物种数占比自夏季单调增长,在冬季的达到最小。空间尺度上,柴汶河流域全年各断面浮游植物物种数有明显差异;CW6绿藻门物种数最多(33种),CW1硅藻门物种数最多(25种)

2.1.2 浮游植物密度及硅藻占比 研究区域浮游植物丰度时空分布见图3。时间尺度上,柴汶河藻类密度全年变化范围为 $7.21 \times 10^6 \sim 3.74 \times 10^7$ cells/L (图3(a)),除2023年5月、9月外,其余时期藻类密度均达到中度藻华水平(DB44/T 2261-2020)。硅藻门密度在2024年2月达到峰值(3.69×10^7 cells/L),硅藻门占比变化趋势与密度变化相似,综合分析说明柴汶河流域硅藻在枯水期生长最优。空间尺度上,柴汶河藻类密度均值为 2.14×10^7 cells/L (图3(b)),除CW2外,其余时期柴汶河藻类密度均达到中度藻华水平(DB44/T 2261-2020);柴汶河硅藻占比为92.40%,综合硅藻密度及其所占比例的空间变化,柴汶河段生态环境极适

宜硅藻生长。

2.1.3 硅藻优势种 研究期间,硅藻门优势种属占总硅藻密度比例变化情况如图4所示,优势属小环藻属、针杆藻属、舟型藻属、菱形藻属和冠盘藻属占硅藻藻密度比例的平均值分别为93.05%、4.06%、1.58%、0.84%和2.01%,小环藻占绝对优势。柴汶河硅藻种群结构呈现一定的演替规律,自2023年5月始,小环藻比例逐渐变大,2023年12月达到最大,说明冬季更适宜小环藻生长。从空间上看,各监测点的优势属小环藻属>>针杆藻属+舟型藻属+菱形藻属+冠盘藻,其占比平均值为95.13%,小环藻属占绝对优势,主导整个硅藻种群。

2.1.4 叶绿素 叶绿素 a 浓度常作为藻类生物量的替代指标从而被广泛使用。柴汶河各断面叶绿素浓度波动范围较大,根据国家《水华遥感与地面监测评价技术规范》及广东省相关地方标准《水华程度分级与监测技术规程》,由图5可以看出除CW7外,其余各点位均达到过中度水

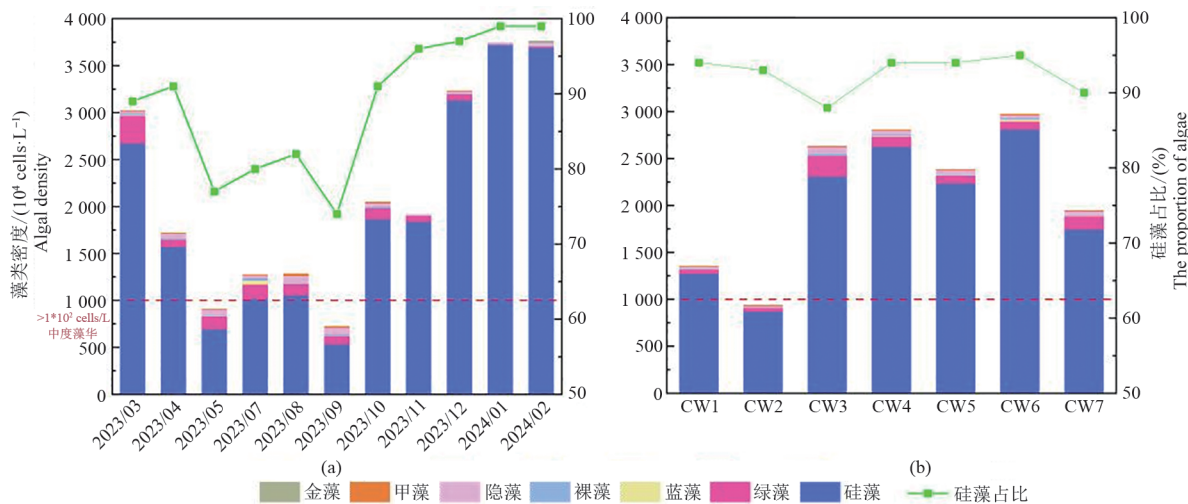


图3 浮游植物密度和硅藻密度比例的月变化,不同断面浮游植物密度和藻密度比例的变化

Fig. 3 Monthly variations of phytoplankton density and the proportion of diatom density, and variations of phytoplankton density and the proportion of algal density in different sections.

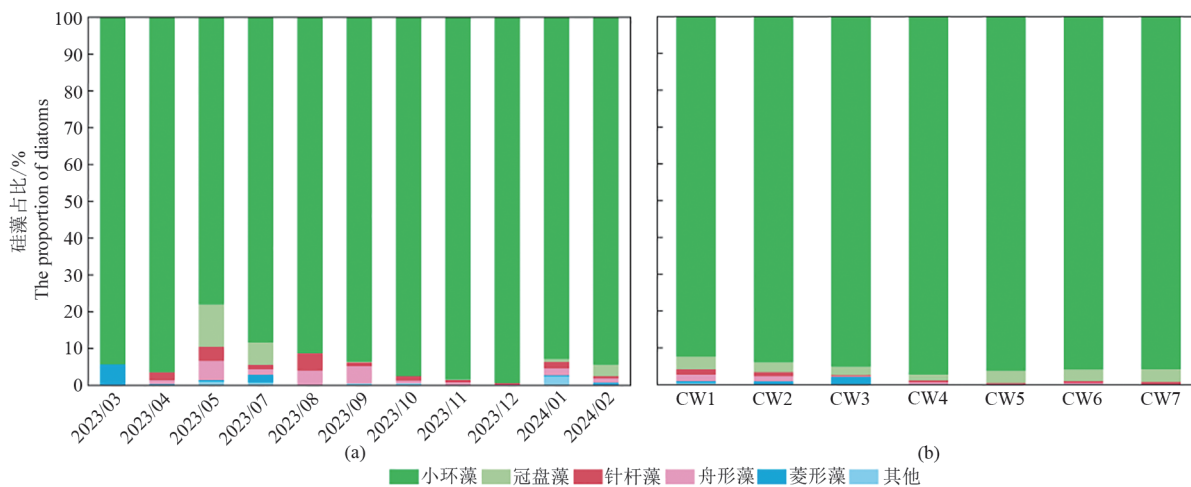


图4 硅藻门优势属种的时间演替,硅藻门优势属种的空间演替

Fig. 4 Temporal succession of dominant genera and species in Bacillariophyta, and spatial succession of dominant genera and species in Bacillariophyta.

华。中游点位叶绿素浓度整体高于上游与下游点位。

2.1.5 氮磷营养盐 柴汶河流域全年水质总氮在所有断面均超地表水V类标准(2.0 mg/L),主要受上游污水厂、矿井水排放及藻类爆发影响,冬季因流速减缓导致浓度显著高于其他季节。总磷在CW2出现最高值(1.3 mg/L),主要与上游养殖与矿井排污有关,畜禽养殖种类主要有生猪、肉牛、奶牛、羊、家禽等,按照《畜禽养殖污染防治规划编制指南(试行)》猪当量折算方法,新泰市生猪存栏量11.13万头,奶牛存栏量0.15万头,肉牛存栏

量0.28万头,羊存栏量0.23万头,家禽存栏量708.64万只。新泰市共核查了涉水企业32家,涉及煤矿、化工、印染、造纸、屠宰等用水排水量较大的行业类别,日均排水量达27 905 t。受河流稀释和藻类消耗作用递减,浓度呈现夏高冬低的特点,这可能与柴汶河藻类主要在秋冬两季剧烈增殖有关。氨氮在CW3达峰值(3.6 mg/L),新泰市2024年作物总种植面积为1 018 km²;该区域种植面积最大的作物类型为玉米,种植面积为296 km²,占比达到29.07%,其次为小麦,种植面积为220 km²,占比为22.13%,农业与工业排污导致上游偏高。中

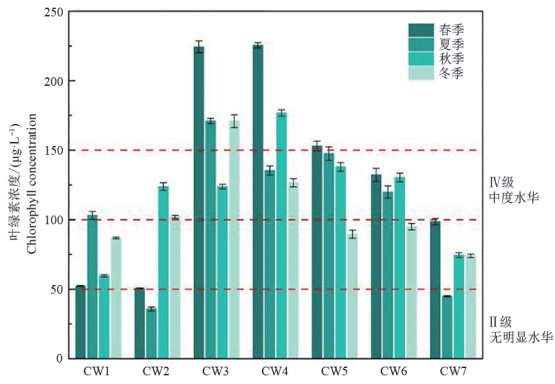


图 5 2023年3月-2024年2月不同季节柴汶河各段叶绿素浓度变化

Fig. 5 Variations in chlorophyll concentration in different sections of the Chaiwen River across various seasons from March 2023 to February 2024

下游多符合III类标准(≤ 1 mg/L), 秋冬季因枯水期排污扩散受限浓度升高。硝酸盐氮浓度下游偏高

(CW7 最高值 11.57 mg/L), 枯水期浓度高于丰水期, 下游 CW5、CW7 超标准限值(10 mg/L), 夏季汛期稀释作用使其浓度降低。整体表明柴汶河流域污染受点源排放如污水厂、矿井、养殖与季节性水文条件及藻类生态过程共同驱动。

2.2 浮游植物和水体理化参数的相关性分析

2.2.1 水体藻类与营养盐参数测定结果及分析 柴汶河流域不同水期水体环境因子间的差异如图 7 所示, 柴汶河枯水期、丰水期和平水期总氮均值分别为 22.78、8.48、13.35 mg/L, 总磷均值分别为 0.077、0.18、0.28 mg/L, 氨氮均值分别为 0.55、0.42、0.73 mg/L, 硝态氮均值分别为 7.55、4.58、5.18 mg/L。多独立样本 *t* 检验结果表明: 全年的藻类密度、总氮、硝态氮具有显著性差异 ($P < 0.001$), 总磷水期差异较显著 ($P < 0.05$), 氨氮水期差异不明显 ($P > 0.05$)。

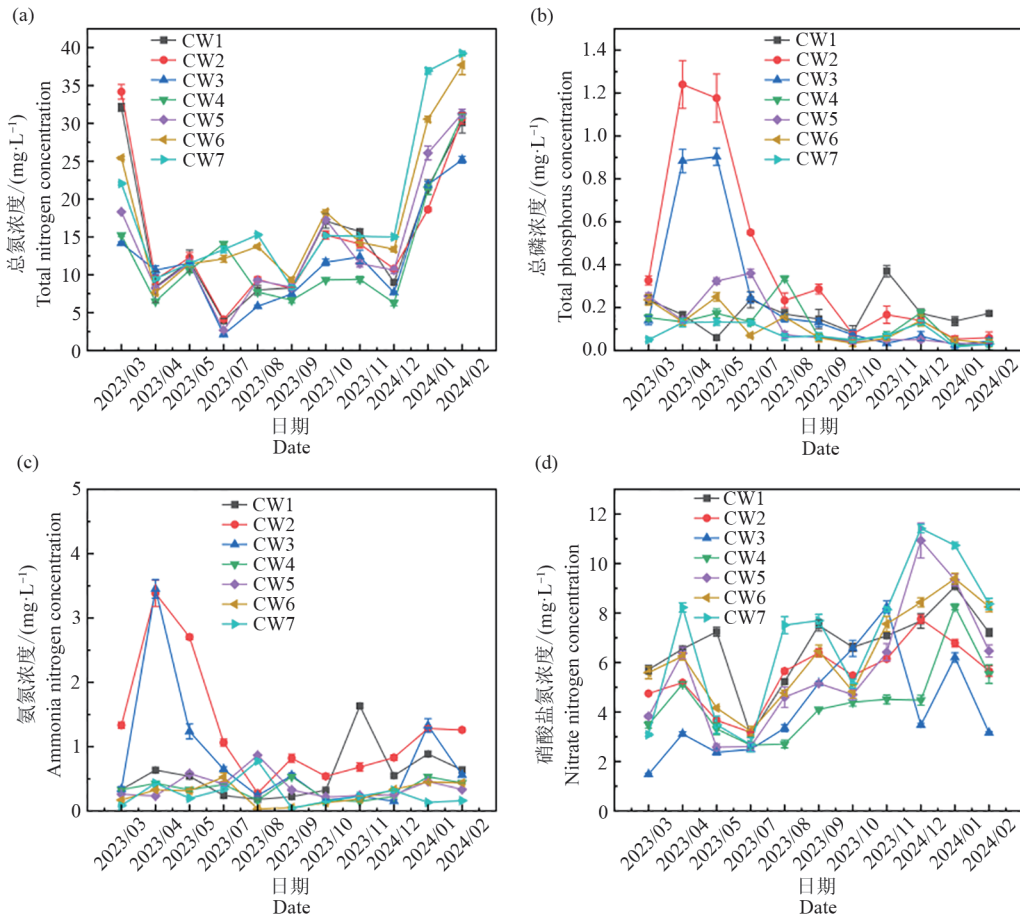


图 6 2023年3月-2024年2月柴汶河各段氮磷浓度变化

Fig. 6 Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in each section of the Chaiwen River from March 2023 to February 2024

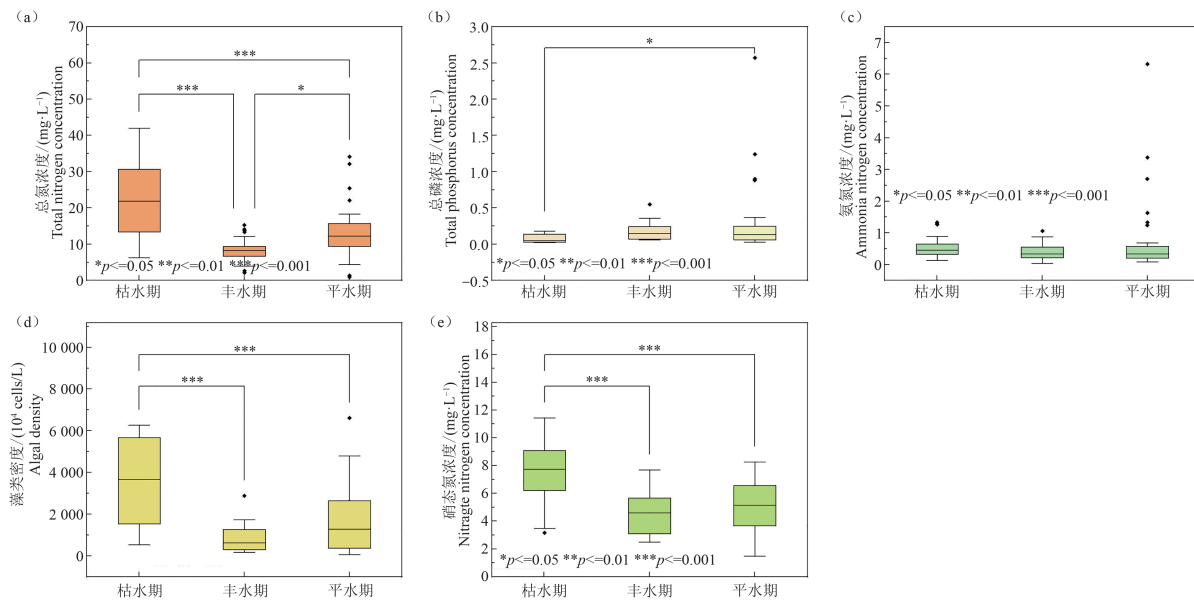


图7 藻类密度和理化参数在不同水期差异图: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$

Fig. 7 Differences in algal density and physicochemical parameters among different water periods: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$

2.2.2 藻类密度与氮磷营养盐相关性分析 柴汶河藻类密度与氮磷营养盐相关性分析如图8所示,通过Pearson相关系数(r)和调整决定系数($Adj R^2$),量化分析了藻类密度、总氮、总磷、氨氮、硝态氮间的线性关联。图中藻类密度:数据呈右偏分布,说明研究时段内藻类多处于“非爆发”状态,仅少数样本存在富营养化潜在风险。总氮分布接近对称,集中在中值附近,反映氮素含量相对稳定。总磷呈左偏分布,说明研究区域磷素整体水平较低。氨氮、硝态氮分布较分散,说明无机氮形态受污染源、生物转化(如硝化/反硝化)影响,变异性大。藻类密度与总氮(TN): $r=0.420$, $Adj R^2=0.165$ 。总氮是藻类合成蛋白质、核酸的核心元素,氮素供应对藻类生长有显著促进作用。藻类密度与总磷 $r=-0.289$, $Adj R^2=0.071$ 。样本中磷含量整体较低,为左偏分布,氮成为更关键限制因子,藻类高密度时伴随磷的吸收/沉降,导致表观负相关。藻类密度与无机氮:两者相关系数氨氮 $r=-0.197$,硝态氮 $r=0.339$, $Adj R^2$ 较低。藻类可利用多种氮形态(氨氮、硝态氮、有机氮),总氮的“综合效应”比单一无机氮形态更显著;此外,氮形态的生物可利用性如氨氮更易被吸收、受pH、溶解氧调控,导致线性关联弱化。

2.2.3 Spearman相关性分析 图9为优势种属密度与各环境因子之间的spearman秩相关性分

析,结果表明,总氮和总磷是影响柴汶河藻类密度变化的主要环境因子。柴汶河藻类密度与总氮显著相关($P < 0.001$),总磷 $r=-0.49$ 呈现中等负相关。负相关反映“氮主导、磷限制”的营养格局:样本中磷含量整体较低,藻类高密度时竞争吸收磷,导致表观负相关或氮磷比失衡(氮过量、磷不足)抑制藻类对磷的利用。与硝态氮较为相关($P < 0.05$),总氮是藻类爆发的核心驱动因子,控氮对抑制藻类增殖更关键。

3 讨论

柴汶河作为黄河水系二级支流,气候为亚热带季风气候,降水季节变化显著,河流形成明显的枯水期与丰水期^[10]。11次采样浮游植物群落特征存在明显的丰水期和枯水期差异,枯水期柴汶河水体中硅藻密度占比大幅增加,优势属小环藻属大量繁殖,造成硅藻水华。不同时期河流流量会对浮游植物群落产生影响^[11],枯水期的柴汶河水体流动性差且受到上游工业污水的排放导致水体中氮磷硅含量高,在营养盐与低温效应的结合下,硅藻成为优势种群。本次研究中柴汶河流域绿藻门种类最多,硅藻门藻类密度最大且在全年均是优势类群,尤其是在枯水期,这与许多研究人员在黄河流域藻类群落结构的研究结果相一致^[12]。柴汶河全年优势藻属为小环藻属,喜

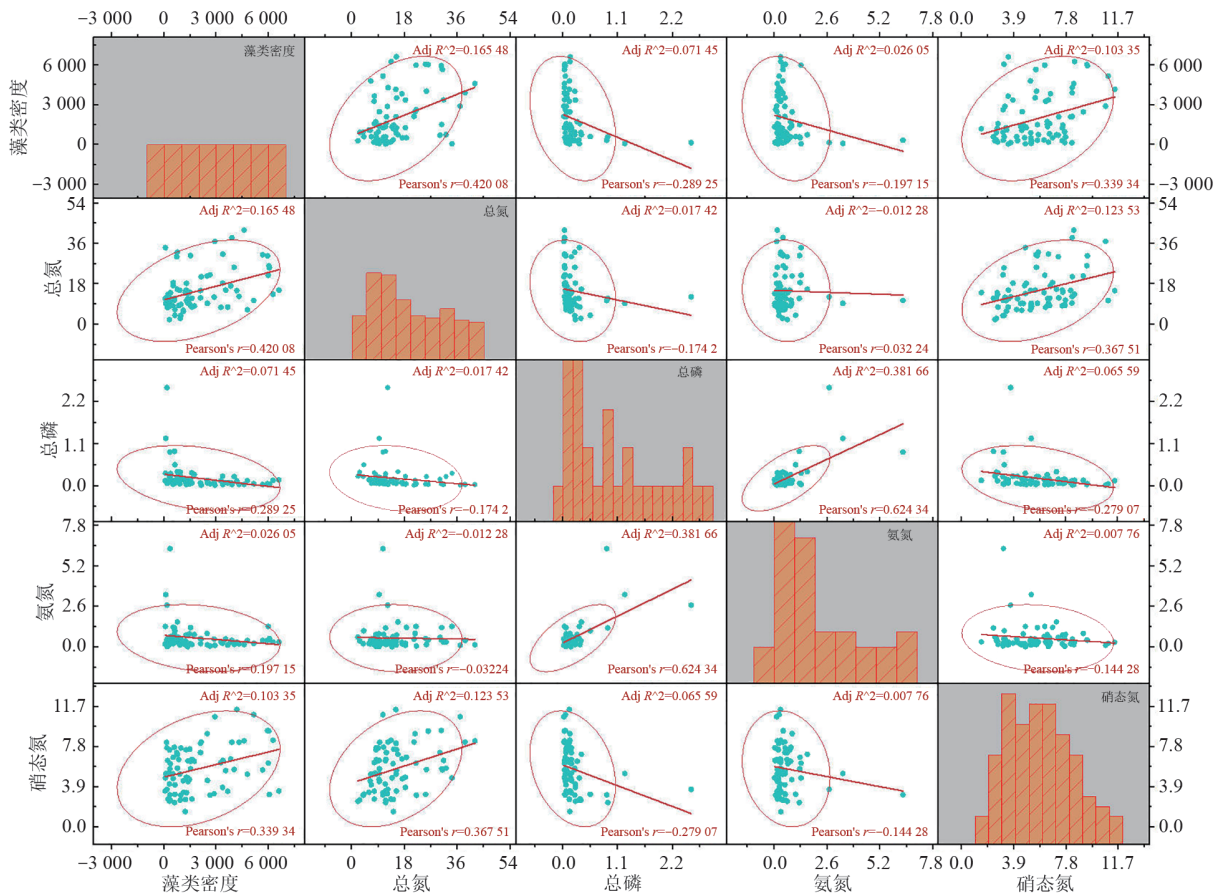
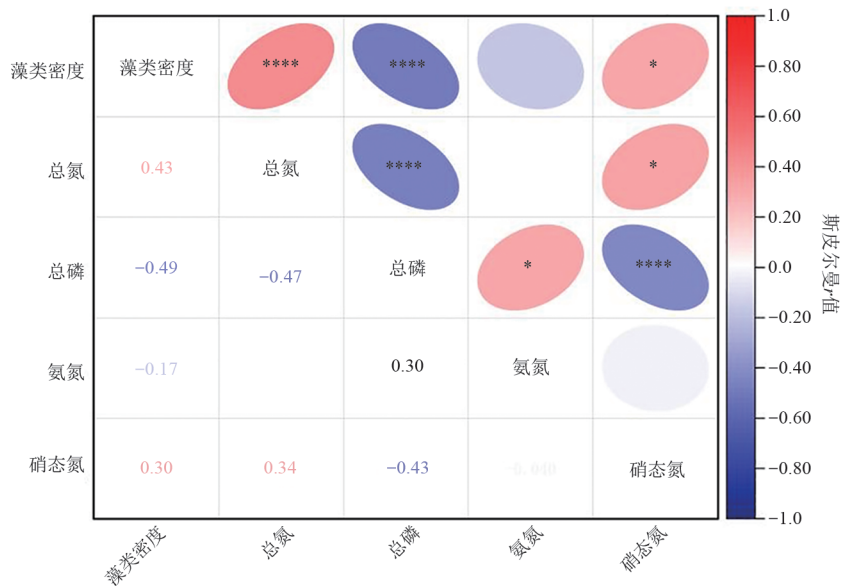


图 8 藻类密度与水理化参数之间相关性的矩阵散点图

Fig. 8 Matrix scatter plot of the correlation between algal density and water physicochemical parameters



* $p < 0.05$ ** $p < 0.001$ *** $p < 0.0001$

图 9 藻类密度与水理化参数之间相关性的热图: * $P \leq 0.05$, 表示两者之间存在显著相关性; ** $P \leq 0.0001$, 表示两者之间存在极其显著的相关性

Fig. 9 Heatmap of the correlation between algal density and water physicochemical parameters: * $P \leq 0.05$ indicates a significant correlation between the two; ** $P \leq 0.0001$ indicates an extremely significant correlation between the two

好混合型的富营养型水域,对缺乏氮条件比较敏感,柴汶河氮充沛,流速缓慢,导致小环藻属在枯水期密度较大。

营养元素氮、磷作为河流初级生产力的物质基础^[13],是藻类生长所必需的营养物质,由于小环藻对氮磷的高需求和高效利用能力,导致该物种在氮磷营养盐浓度较高的水体中更容易形成优势种群^[14-16];氮和磷的增加浮游植物群落生物量积累的显著增加^[17]。氮和磷对藻类密度的影响是协同的柴汶河上游大量氮和磷营养盐的输入使得几乎处于静态的水域形成水体富营养化,进而触发藻华的快速生长^[18],营养盐的存在不仅对藻类细胞内ATP的合成有着直接影响^[19,20],还会改变藻类的蛋白质结构^[21]。硅藻能分解吸收大部分氮化合物,硝酸盐作为水环境中溶解氮的主要组成^[22],是硅藻氮源的主要来源之一。硅藻对硝态氮的吸收方式主要通过将其转化成氨态氮进行从而促进蛋白质的合成,且其转化程度与硝态氮浓度呈正相关^[23];有研究表明富集的硝酸盐能使小环藻抵抗氨的胁迫^[24]或是促进反硝化菌的生长提高反硝化的效率^[25]从而促进小环藻生长,柴汶河上游多家化工厂及矿场输入了大量的硝酸盐,为小环藻的爆发创造了条件。Zhang等^[26]在培养梅尼小环藻的过程中发现,NO₃-N培养基对应的Chla(Chlorophyll-a,叶绿素a)浓度高于同等条件的NH₄⁺-N培养基。在磷浓度受到限制时,与光合作用相关的基因表达上调,藻细胞高速耗能,直至储存磷素耗尽^[27],在磷缺乏条件下培养的硅藻所报告的分子反应中,包括编码与这种营养物质的转运、同化、再利用和循环相关的酶的基因的上调。在生化反应方面,由于蛋白质和磷脂合成所需的碳结构需求降低,固定下来的二氧化碳量多于卡尔文循环所消耗的量。为了处理这种过剩,硅藻将碳流重新导向合成诸如三酰甘油和碳水化合物等储存化合物,这些化合物以胞外聚合物的形式排出体外^[28]。总磷浓度大于0.015 mg/L认为是足以导致藻类大量繁殖^[29]的浓度,而N/P的不平衡是水富营养化的特征之一,是导致水华的根本原因^[30]。枯水期柴汶河整体呈现高氮磷比的规律,从而导致柴汶河在枯水期更容易发生藻华。

从理论的角度来看,控制营养物质进入河流可能是一个很好的策略,因为营养物质是藻类生

长的重要来源。然而,控制营养物质在现实中是一项长期策略,因为营养物质负荷很难迅速减少^[31]。生物法是解决问题的长期策略,但营养盐供给的上行效应仍会导致较高的浮游植物生物量^[32,33]。淡水硅藻水华的成因较为复杂,现有研究普遍认为,温度、光照、营养盐、流量、流速等因素是硅藻水华的关键爆发因子。但目前仍不能明确淡水硅藻水华爆发的主导因子^[34]。针对一些有实际应用但治理成效较差或仅在局部水域发挥成效而无法大面积推广应用的藻华控制技术,可考虑与其他具有协同治理效果的技术联用,优化集成关键或成套技术,也可与生态修复技术相结合^[35],加快改善局部生态环境,进一步提藻华控制效果^[36,37]。

4 结论

2023年3月~2024年2月调查柴汶河流域氮磷营养盐时空变化及藻华优势种,分析总氮、总磷、氨氮、硝酸盐氮指标,揭示污染规律与藻华成因,提出系统性治理方案。

(a)浮游植物群落特征

柴汶河全年共鉴定浮游植物151种,硅藻门为绝对优势类群(枯水期密度峰值 3.74×10^7 cells/L,达中度水华),其中小环藻属占比95.13%。空间上,硅藻密度自上游(CW1)至中游(CW4)递增,下游因营养盐消耗而降低;物种丰富度CW6断面为最高(79种)。

(b)氮磷营养盐时空变化

总氮浓度远超V类水质标准(峰值39.5 mg/L, CW7),冬季因流速减缓污染物累积显著高于其他季节,污染源主要为污水厂排放及矿井水。总磷中上游(CW2)浓度最高(1.3 mg/L),春夏高于秋冬,与畜牧养殖排污直接相关,下游因藻类吸收及稀释作用降低。氨氮(NH₄⁺-N)在CW3达峰值(3.6 mg/L),主要受工业农业排污影响。硝态氮(NO₃⁻-N)枯水期下游(CW7)超标(11.57 mg/L),主要与化工厂排放及地下水输入有关。

(c)藻类与营养盐的关联机制

藻类密度与总氮正相关($P < 0.001$),表明氮是柴汶河藻华的核心驱动因子;与总磷呈负相关($r = -0.49$),反映磷限制背景下藻类高密度吸收加剧磷短缺。小环藻暴发依赖高氮环境,上游硝酸盐输入可能通过促进反硝化菌活动间接支持

其生长。

(d) 综合治理措施

污染物“分区-分级-协同”是精准高效的环境管理模式。分区以生态功能和质量为目标,结合国土空间规划,划分为优先保护、重点管控和一般管控单元,差异化管控。分级遵循国家指导、省级统筹、市级落地原则,分层落实方案。协同涵盖战略目标、部门监管、污染控制及保障机制等方面,统筹发展与保护,强化多部门、多介质治理协同,形成多方参与格局,提升治理系统性与整体性。

分区:上游源头区(CW1-CW3)定位为重点管控区。核心任务是控源截污,严控规模化养殖粪污排放(面源)和工业园区达标排放。中下游城镇段(CW4-CW7)定位为优先治理与修复区。核心任务是强化点源治理与生态流量保障。

分级:统筹协调跨市治理,制定流域性氮磷总量控制目标,监督考核。负责辖区内的“分区”方案落地,细化管控措施,组织实施重点工程。具体执行面源管控、巡查执法、应急响应。

协同:将“分区”治理目标(如上游控磷、中下游控氮补水)与山东省“十四五”流域考核达标、黄河流域生态保护刚性要求对齐。建立“河长+警长+检察长”机制,强化生态环境、水利、农业、住建等部门在污染源监管、水量调度、农业面源防治、管网建设等方面的联动。点源与面源措施同步推进。

在枯水期对中下游高水华风险区(CW4-CW7)实施跨区生态补水(如协调大汶河水库下泄生态流量),增加流速流量,打破稳定水文条件,缓解硅藻水华暴发,并促进污染物输移扩散。

参考文献

- [1] Leland HV, Porter S. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use[J]. *Freshwater Biology*, 2000, 44(2): 279-301.
- [2] Wu N, Dong X, Liu Y, et al. Using river microalgae as indicators for freshwater biomonitoring: Review of published research and future directions[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 124-131.
- [3] Ballesteros I, Castillejo AP, Haro C, et al. Genetic barcoding of Ecuadorian epilithic diatom species suitable as water quality bioindicators[J]. *Comptes Rendus Biologies* 2020, 343: 41-52.
- [4] Grachev M, Bukin Y, Blinov V, et al. Is a high abundance of spring diatoms in the photic zone of lake baikal in July 2019 due to an upwelling event? [J]. *Diversity*, 2021, 13(10): 504.
- [5] Karthik R, Robin RS, Anandavelu I, et al. Diatom bloom in the Amba River, west coast of India: a nutrient-enriched tropical river-fed estuary[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2020, 35: 101244.
- [6] Moorhouse HL, Read DS, McGowan S, et al. Characterisation of a major phytoplankton bloom in the River Thames (UK) using flow cytometry and high performance liquid chromatography[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 366-376.
- [7] 凌虹, 朱晓晓. 基于生态功能定位的太湖流域水生态安全评估[J]. *生态环境学报*, 2024, 33(03): 418-427.
- [8] 王祝, 邵蓓, 周会东, 等. 西藏拉鲁湿地水质净化功能研究[J]. *湿地科学与管理*, 2024, 20(02): 34-38+44.
- [9] 刘罗林. 柴汶河藻类发生规律及影响机理的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
- [10] 吴璇, 宋一心, 王金晓, 等. 山东省柴汶河上游地区地下水化学特征分析[J]. *环境化学*, 2021, 40(07): 2125-2134.
- [11] 侯颖, 李信, 白灵, 等. 不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5616-5626.
- [12] 王飞虎, 杨越, 张洋, 等. 黄河流域河南段浮游藻类功能群分布特征及影响因子[J]. *水生生物学报*, 2024, 48(03): 513-523.
- [13] 徐智健, 罗千里, 黄露, 等. 华南中小型闸控入海河流氮磷化学计量学特征及其影响因素研究[J]. *环境科学研究*, 2025, 38(02): 304-317.
- [14] 许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(05): 1239-1247.
- [15] 陈艳, 范明鉴, 李杲光, 等. 氮浓度对小环藻、大型溞和金鱼藻相互作用的影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(12): 1427-1431+1464.
- [16] 靳萍, 徐婷婷, 杨佩昀, 等. 磷浓度对小环藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(01): 103-108.
- [17] Saito MA, Goepfert TJ, Ritt JT. Some thoughts on the concept of colimitation: Three definitions and the importance of bioavailability[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(1): 276-290.
- [18] 王睿喆, 王沛芳, 任凌霄, 等. 营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(04): 1301-1308.

- [19] Metsoviti MN, Katsoulas N, Karapanagiotidis IT, et al. Effect of Nitrogen concentration, two-stage and prolonged cultivation on growth rate, lipid and protein content of *Chlorella vulgaris*[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2019, 94(5):1466-1473.
- [20] Lehtola MJ, Miettinen IT, Keinänen MM, et al. Microbiology, chemistry and biofilm development in a pilot drinking water distribution system with copper and plastic pipes[J]. Water Research, 2004, 38(17): 3769-3779.
- [21] Chokshi K, Pancha I, Ghosh A, et al. Nitrogen starvation-induced cellular crosstalk of ROS-scavenging antioxidants and phytohormone enhanced the biofuel potential of green microalga *Acutodesmus dimorphus* [J]. Biotechnology for Biofuels, 2017, 10(1):1-12.
- [22] 涂春霖, 陈庆松, 尹林虎, 等. 我国地下水硝酸盐污染及源解析研究进展[J]. 环境科学, 2024, 45(06):3129-3141.
- [23] 郑鑫, 王文静, 盛彦清. 硝态氮对库区水体藻类和细菌群落的影响[J]. 湖泊科学, 2023, 35(06):1917-1926.
- [24] Gyutae K, Linh T L, Joeun J, et al. Effects of light and mass ratio of microalgae and nitrifiers on the rates of ammonia oxidation and nitrate production[J]. Biochemical Engineering Journal, 2020, 61:107656.
- [25] Zhang ZS, Guo YD, Guo L, et al. Elucidating salinity adaptation and shock loading on denitrification performance: Focusing on microbial community shift and carbon source evaluation[J]. Bioresource Technology, 2020, 305:123030-123037.
- [26] Zhang JY, Ni WM, Zhu YM, et al. Effects of different nitrogen species on sensitivity and photosynthetic stress of three common freshwater diatoms[J]. Aquatic Ecology, 2013, 47(1):25-35.
- [27] Yang ZK, Zheng JW, Niu Y, et al. Systems-level analysis of the metabolic responses of the diatom *Phaeodactylum tricorutum* to phosphorus stress[J]. Environmental Microbiology, 2014, 16(6):1793-1807.
- [28] Lovio-Fragoso JP, De Jesús-Campos D, López-Eliás JA, et al. Biochemical and molecular aspects of phosphorus limitation in diatoms and their relationship with biomolecule accumulation[J]. Biology, 2021, 10:565.
- [29] Evelyn EG, Jennifer HR, Joel C T, et al. Comment on "Estimating Ecological Thresholds for Phosphorus in the Everglades"[J]. Environmental Science and Technology, 2008 42 (17):6770-6771.
- [30] Zheng NN, Hu W, Liu Y, et al. Phycospheric bacteria limits the effect of nitrogen and phosphorus imbalance on diatom bloom[J]. Science of The Total Environment, 2024, 935:173477.
- [31] Tian J, Guo SL, Wang J, et al. Preemptive warning and control strategies for algal blooms in the downstream of Han River, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 142:109190.
- [32] Zhu GW, Jin YW, Ren J, et al. Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1):9-21.
- [33] Zhu GW, Chen WM, Li HP, et al. Response of water quality to the catchment development and protection in Tianmuhu Reservoir, China[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(6):809-817.
- [34] 文刚, 白愿楠, 王茹, 等. 淡水硅藻水华成因与控制技术研究进展[J]. 环境科学研究, 2024, 37(02): 316-325.
- [35] Xie P, Liu J. Practical success of biomanipulation using filter feeding fish to control cyanobacteria blooms: a synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake[J]. The Scientific World Journal, 2001, 1:337-356.
- [36] Barrett PRF, Littlejohn JW, Curnow J. Long-term algal control in a reservoir using barley straw [J]. Hydrobiologia, 1999, 415: 309-313.
- [37] Liu JJ, Peng JY, Wu Q. Research status and prospect of ecological floating island technology[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(15):47-49.