

流速对梅尼小环藻细胞生长的影响机理

张建伟¹, 马洪东¹, 宋刚福², 周子俊¹, 郭思彤³, 张传普⁴

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 华北水利水电大学生态环境学院, 河南 郑州 450046; 3. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 4. 河南省生态环境监测和安全中心, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】流速是影响藻细胞生长的关键因素,也是基于水动力原理抑制藻类生长的最佳环境控制因子。揭示不同流速生长环境下梅尼小环藻细胞的生长规律及影响机理,对于防控水体藻华、探究水动力胁迫下浮游藻类的生长机理等具有重要意义。【方法】选取南水北调中线工程河南段硅藻优势种梅尼小环藻作为研究对象,通过自制相关试验装置,模拟0.0~1.0 m/s流速梯度环境,测定不同流速条件下梅尼小环藻的藻细胞密度、细胞比增长率、光合色素含量和碱性磷酸酶活性等指标,解析其生长规律及影响机理。【结果】梅尼小环藻的临界流速阈值为0.4 m/s,在不同流速环境下呈现“低促高抑”的生长规律。低流速(0.0~0.4 m/s)通过提高藻细胞与营养物质的接触频率,进而促进藻细胞吸收营养物质;高流速(0.6~1.0 m/s)引发的流体切应力可造成细胞结构出现不同程度的机械性损伤,进而抑制藻细胞生长。【结论】流速对梅尼小环藻细胞的生长具有双重影响;临界流速与细胞的承载力密切相关。

关键词:流速;梅尼小环藻;影响机理;水动力学

中图分类号:X172

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2025)04-0030-07

随着全球气候变化加剧和人类活动的持续影响,生态环境严重退化,藻类爆发性生长现象频发,给水生态安全带来严重威胁^[1-2]。如何在不过度干预水体生态系统的前提下,合理解决藻类过度生长问题,已成为水生态领域的研究热点。近年研究发现,环境流速作为常规水动力条件对藻类生长具有较大影响,并且在实际工程中环境流速等水动力条件相对更容易调节和控制^[3],为解决藻类爆发性生长问题提供了新的研究思路。

现阶段,针对流速对藻细胞生长的研究多集中于流速对藻细胞增殖、形态、代谢、营养盐吸收及酶活性的影响^[4-6]。如颜润润等^[7]通过模拟波浪发现,铜绿微囊藻的生长与环境流速具有一定关系,并测得了试验条件下的最佳生长流速;MITOVIC S M等^[8]通过模拟试验发现,低流速会促进藻类生长,高流速会抑制藻类生长;ZHU J等^[9]发现不同藻类对应的临界流速不同,超过临界流速会抑制细胞生长;JIANG L Y等^[10]通过模拟水体扰动发现,流速可能是通过影响铜绿微囊藻光

合作用强度间接影响藻细胞生长;张毅敏等^[11]发现铜绿微囊藻在小于0.5 m/s的流速环境下,藻细胞生长与流速呈现正相关。截至目前,结合实际工程的藻类治理研究较少,无法满足工程后续健康运行需求。特别对于大型引调水工程,水质安全是工程运行效益的重要参考指标。南水北调中线工程作为我国“四横三纵”水网主干之一^[12],是解决水资源空间分布不均、保障国民经济可持续发展的重大战略性工程^[13]。但中线工程水体中藻类含量偏高,对水质安全造成一定的消极影响。相关研究^[14-15]表明,南水北调中线工程的优势藻种为梅尼小环藻。目前,针对南水北调中线工程藻类治理的研究较少,环境流速对梅尼小环藻的影响规律尚不清晰,导致现阶段无法利用水力学原理生态、高效地抑制藻类生长。因此,探究中线干渠环境流速对硅藻优势种梅尼小环藻的影响规律和影响机理对工程后期基于水动力学原理抑制藻类生长具有重要意义。

本研究选取梅尼小环藻作为研究对象,探究流

收稿日期/Received: 2024-01-18

修回日期/Revised: 2024-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(42407320);河南省科技攻关项目(222102320023)。

第一作者:张建伟(1979—),男,教授,博导,博士,从事生态水工和水工结构安全方面的研究。E-mail: zjwcivil@126.com。

通信作者:宋刚福(1977—),男,教授,博导,博士,从事水生态修复和水环境治理方面的研究。E-mail: sgf@ncwu.edu.cn。

速对藻细胞生长的影响规律,结合试验结果分析不同流速梯度对藻细胞的影响机理,以期为南水北调中线工程利用水动力学原理解决藻害问题提供一定的理论支撑。

1 装置与方法

1.1 试验材料

选取梅尼小环藻 (FACHB-2828) 作为试验材料和培养基 (CSI),其购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库。将藻种按照培养要求,置于培养箱 (LRH-250F) 内,扩大培养后用于后期试验研究。自制试验装置为环形有机玻璃水槽,水槽外尺寸为长 70 cm、宽 40 cm、高 22 cm,容积约为 18 L。通过改变轮机叶片旋转速度调节所需试验流速,流速测定选用便携式智能流速仪器 (LGY-II)。试验分析阶段,通过改进试验装置,即在玻璃水槽内壁设置凸起结构,模拟紊流生长环境。自制试验装置的俯视简图如图 1 所示。

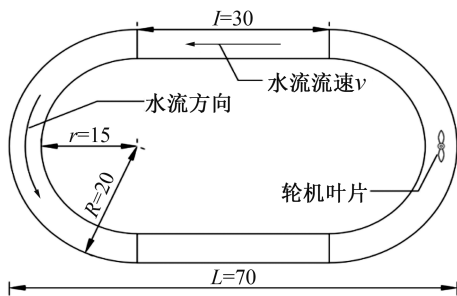


图 1 试验装置俯视简图 (单位:cm)

Fig. 1 Schematic top view of the experimental setup (unit: cm)

1.2 试验过程

根据南水北调中线工程实际运行情况,对 0.0~1.0 m/s 范围以 0.2 m/s 为间隔设定 6 个试验流速条件,以静水组为对照组,分别向每个试验组中加入培养基和梅尼小环藻原液,设置初始藻密度均为 2.52×10^4 cells/mL,同时保证试验过程中营养盐等含量始终满足藻类生长需求,设置水温保持在 25 °C、光照 5 000 lx、光暗比 12 h : 12 h,试验周期为 14 d。试验共测定藻密度、比增长率、叶绿素 a 浓度 (Chl-a 浓度)、类胡萝卜素浓度 (Car 浓度) 和碱性磷酸酶活性 5 项藻类生长指标,间隔 48 h 记录一次生长指标,取样时选取 3 个平行样保证试验数据的准确性。

总磷 (TP) 和总氮 (TN) 浓度采用总氮测定仪 (MI-200K) 进行测量;Chl-a 浓度和 Car 浓度采用

紫外可见光光度法测定^[16];取 5 mL 藻液,离心处理后弃去上清液将藻细胞重悬于甲醇中并水浴 (60 °C 10 min),再次离心处理后,使用紫外分光度计测量上清液的吸光度,并进行计算;碱性磷酸酶活性选用对硝基苯磷酸二钠法测定^[17];取 5 mL 藻液加入 5 mL 对硝基苯磷酸二钠法溶液,恒温培养后加入缓冲剂和试剂进行稀释,静置 30 min 后测定吸光度值并计算;利用 SR-藻类计数框在显微镜下直接计数,记录藻细胞密度并通过式 (1) 计算比增长率。

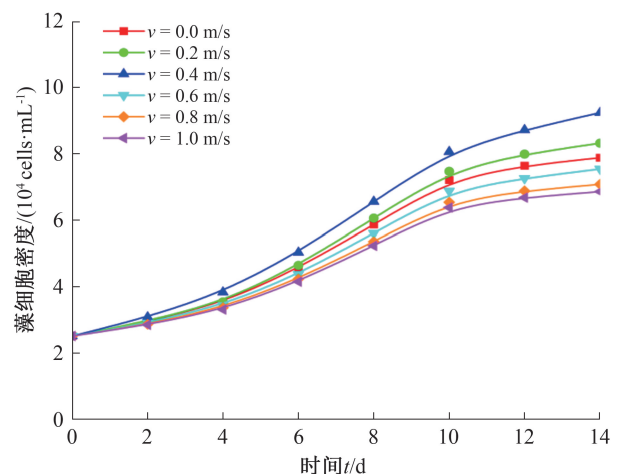
$$\mu = \frac{\ln X_n - \ln X_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad (1)$$

式中: μ 为比增长率; $\ln X_n - \ln X_{n-1}$ 为相邻两次藻细胞密度差的对数值; $t_n - t_{n-1}$ 为相邻两次取样的时间差,本文为 48 h。

2 试验结果

2.1 流速对梅尼小环藻细胞生长的影响

不同流速环境下藻细胞的生长状况如图 2 所示。由图 2 可知:①藻细胞密度在试验开始 4 d 后呈现明显变化,在试验开始 10 d 后各试验组藻细胞比增长率差异减小。②当试验流速低于 0.4 m/s 时,随流速增大,小环藻细胞增长速率加快;当流速为 0.4 m/s 时,藻细胞生长速率最高;当流速高于 0.6 m/s 时,藻细胞生长受到抑制,且流速越大抑制效果越明显。因此,认为 0.4 m/s 可能为试验测得小环藻的临界流速。③试验中通过 0.8 m/s 和 1.0 m/s 两组藻细胞密度数据可知,当流速大于 0.8 m/s 时,藻细胞密度远小于静水组的藻细胞密度,且流速增大对小环藻细胞生长的影响降低。



(a) 藻细胞密度变化

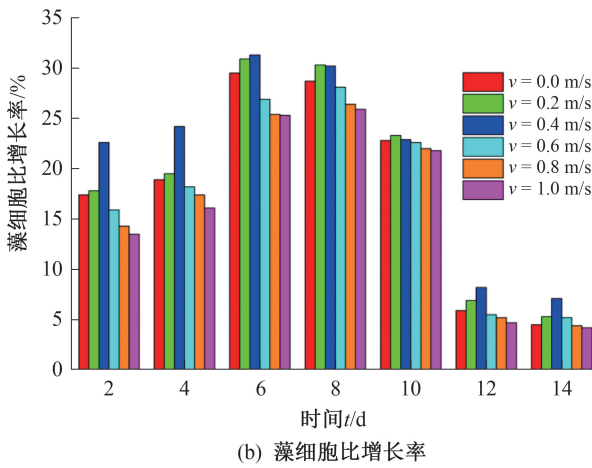


图2 不同流速环境下藻细胞生长状况
Fig.2 Growth status of algal cells under different flow velocities

2.2 流速对水体营养盐含量和碱性磷酸酶活性的影响

不同流速梯度环境下 TP 和 TN 的变化率如图 3 所示。由图 3 可知, TN 和 TP 的变化率存在较大差异:当流速为 0.4 m/s 时, TN 和 TP 的变化率分别为 0.568 和 0.168, 均为试验组中最大变化率, 说明在此流速环境下梅尼小环藻的细胞代谢速率最大; 当流速大于 0.6 m/s 时, TN 和 TP 的变化率与流速呈负相关; 当流速为 0.8 m/s 和 1.0 m/s 时, TN 和 TP 的变化率相对静水组的较小。由于藻细胞需要吸收外源氮、磷作为维持细胞代谢和生长的能源供给^[18], 因此, 水体中营养盐含量变化率可以间接表征不同试验组中细胞代谢强度。

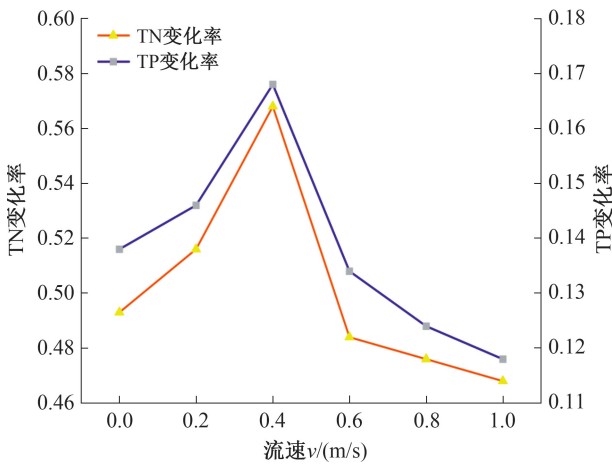


图3 不同流速环境下变化率
Fig.3 Rate of change under different flow velocities

不同流速环境下碱性磷酸酶活性的变化情况如图 4 所示。由图 4 可知, 不同流速环境下藻细胞内碱性磷酸酶活性差异显著, 其中高流速组 (流速 > 0.4 m/s) APA 活性显著低于 0.4 m/s 流速试验

组的, 碱性磷酸酶活性变化趋势与试验中 TP 的变化率相对应。当流速低于 0.4 m/s 时, 随流速增大梅尼小环藻细胞的代谢能力增强, 且 0.4 m/s 流速时细胞代谢能力最强, 说明环境流速会影响藻细胞内相关酶活性。

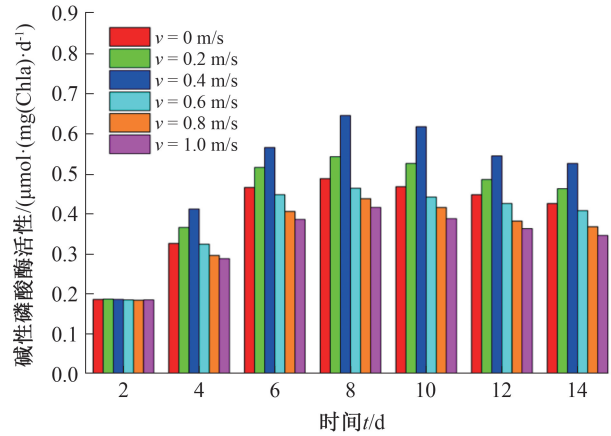
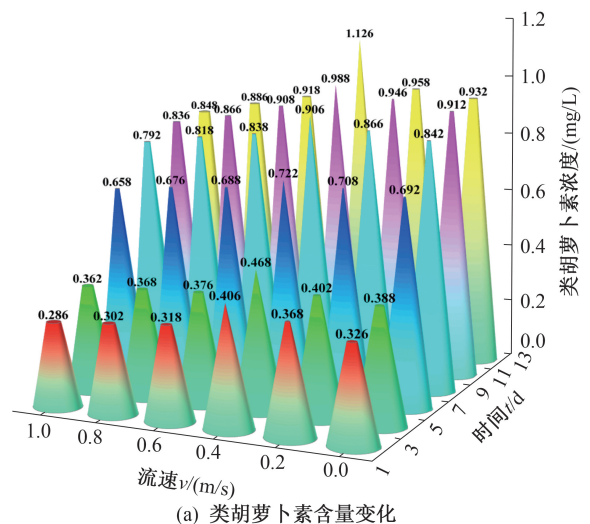


图4 不同流速环境下碱性磷酸酶活性
Fig.4 Alkaline phosphatase activity under different flow velocities

2.3 流速对藻细胞光合色素含量的影响

不同流速环境下光合色素含量的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知, 起始阶段各试验组光合色素 (Chl-a, car) 的含量基本相同, 在试验进行第 6 天时各试验组色素含量差异变大。同时, 0.4 m/s 流速试验组的光合色素含量明显高于其他试验组的, 且当生长流速低于 0.4 m/s 时, 光合色素含量与流速呈现正相关, 当流速大于 0.6 m/s 时, 流速越高类胡萝卜素和叶绿素 a 含量越低, 其中 0.8 m/s 和 1.0 m/s 两个试验组的色素含量明显低于静水组的。该试验结果与王玲玲等^[19]对香溪河流速与 Chl-a 总量间呈负相关关系的研究结论相互验证。同时, 根据对比各试验组色素含量变化, 发现流速对叶绿素 a 含量的影响相对类胡萝卜素含量的影响更大。



(a) 类胡萝卜素含量变化

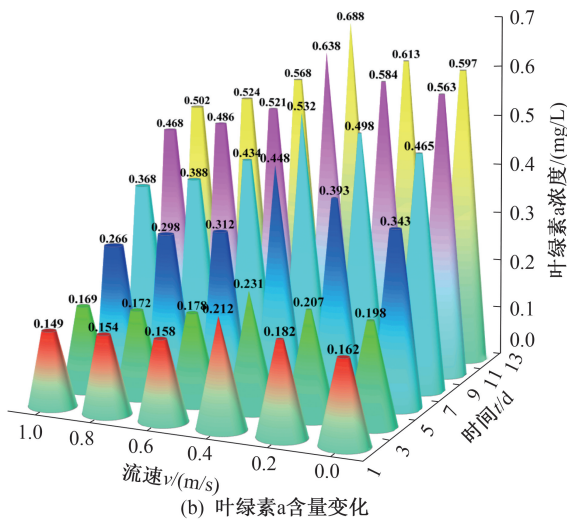


图 5 不同流速环境下光合色素含量变化
Fig. 5 Changes in photosynthetic pigment content under different flow velocities

3 分析与讨论

综合分析试验中细胞密度、营养盐含量和光合色素含量变化规律,得到小环藻细胞在低流速环境下细胞生长被促进,高流速环境下细胞生长受抑制的规律。这与陈伟民等^[20-21]关于流速对藻细胞生长呈现“低促高抑”的试验结论相印证。为了进一步探究不同流速梯度对藻细胞生长的影响机理,基于上述试验结果,将试验流速分为两个梯度范围,分别为 0.0~0.4 m/s 和 0.2~0.6 m/s,以揭示低流速促进藻细胞生长及临界流速(0.4 m/s)的影响机理。

3.1 低流速环境对梅尼小环藻细胞生长的影响机理

结合上述试验结果,通过改变流态来对比相同条件下紊流和层流环境中藻细胞的生长情况,设置紊流对照组探究低流速环境促进藻细胞生长的影响机理。

相同流速环境下(紊流-层流)藻细胞密度的变化情况如图 6 所示。由图 6 可知,流速相同时,紊流环境下的藻细胞生长状态优于层流环境的。这与 MUSIELAK M 等^[22-23]通过试验探究和分析实际河流内藻细胞生长情况得到的结论相印证。除此之外,通过对比 0.2 m/s 流速紊流条件与 0.4 m/s 流速层流条件下藻细胞密度的变化情况(图 7)发现,在较低流速(0.2 m/s)紊流条件下的藻细胞生长状况优于层流状态下最佳流速(0.4 m/s)的生长状况。这是因为适当的扰动会增大营养物质与细胞表面的接触频率,从而提高藻细胞对营养物质的吸收效率^[24]。同时,紊流流态与层流流态的最大区别在于流体流线混杂,这同样增大了藻细胞与营养物质的接触频率。因此,在低流速环境下,

流速影响藻细胞生长的主要机制是:流速的增大增加了藻细胞与营养物质的接触频率,促进藻细胞对营养物质的吸收,但流速的改变也会影响碱性磷酸酶活性。此外,陈瑞弘等^[25]从细胞学的角度研究发现,适当增加流速会加快细胞周围营养盐的扰动,使藻细胞扩散层变薄,更易吸收营养物质。由此可见,在低流速情况下,流速对藻细胞生长的影响是多因素耦合作用的结果。

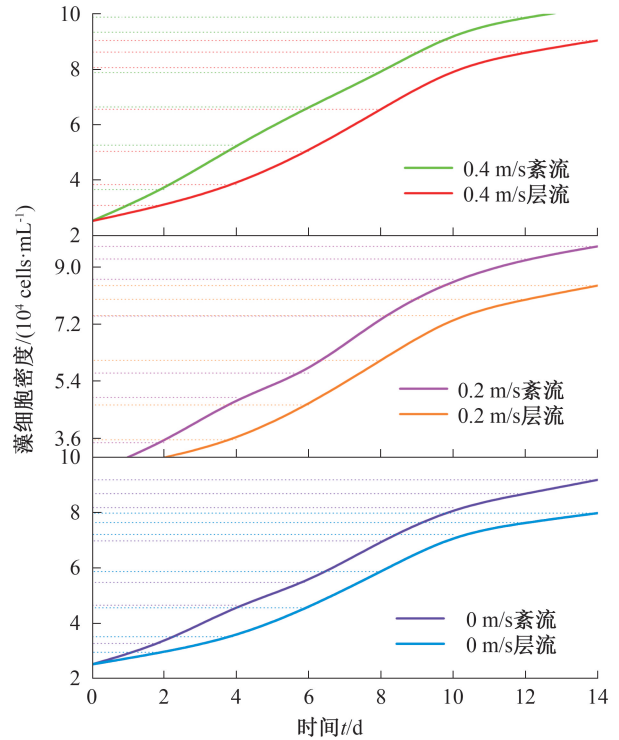


图 6 相同流速环境下(紊流-层流)细胞密度变化
Fig. 6 Changes in cell density under constant flow velocity (turbulence vs. laminar)

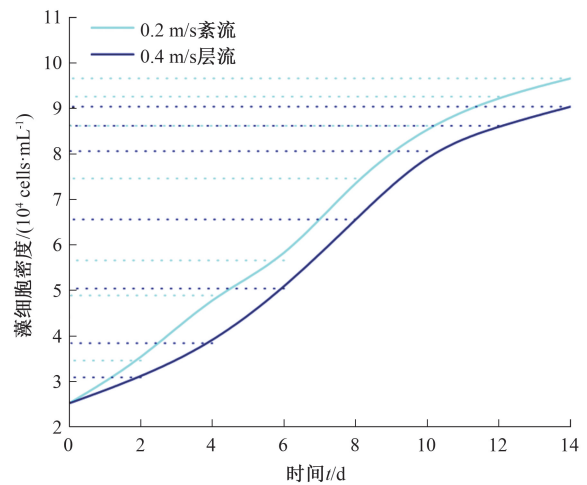


图 7 0.2 m/s 流速紊流条件与 0.4 m/s 流速层流条件下藻细胞密度对比
Fig. 7 Comparison of microalgal cell density under turbulent flow at 0.2 m/s and laminar flow at 0.4 m/s

3.2 梅尼小环藻细胞临界流速影响机理

不同流速环境下藻细胞的电镜图如图8所示。由图8可知,不同流速环境下藻细胞膜结构有明显差异。同时,已有大量研究发现不同藻细胞的临界流速差异明显^[26]。JIANG L Y等^[10]通过试验发现,同种藻类在不同营养状态下的临界流速不同,在流体环境中,细胞生长状态与流体切应力密切相关,流体力学特征的改变直接影响细胞形态。国内外多位学者在相关研究中均发现,流体切应力达到临界阈值时会破坏细胞结构^[27-28],以细胞自身作为研究主体,细胞结构改变与细胞承载力密切相关,对于不同细胞或不同营养状态下的相同细胞,细胞承载力会存在一定差异。由此可知,临界流速的产生可能是流体切应力破坏了藻细胞结构,进而影响其正常代谢,抑制藻细胞生长。试验中通过观察临界流速环境下梅尼小环藻的细胞结构发现,在流速为0.4 m/s的环境下藻细胞膜出现机械损伤。

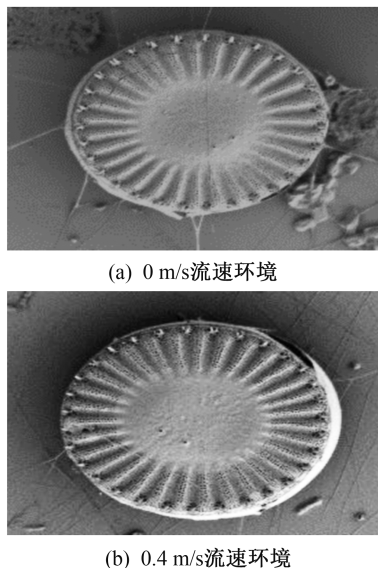


图8 不同流速环境下的藻细胞电镜图

Fig. 8 Scanning electron micrographs of microalgae under different flow velocities

流体切应力破坏了细胞结构,导致出现临界流速这一观点,合理解释了不同营养状态下同种藻细胞临界流速不同的原因。在低流速即切应力较小的生长环境中,随流速增大,流体切应力变化与流速促进藻细胞捕获营养物质的作用共同存在,但后者占主导地位,故较低流速梯度下流速增大促进藻细胞生长。这与上述试验中低流速情况下流速对藻细胞的影响机理相吻合。

4 结论与展望

选取硅藻优势种梅尼小环藻作为研究对象,通

过设置不同流速环境试验组来探究流速对藻细胞生长的影响及作用机理,得到以下结论:

1) 试验中,藻细胞生长总体呈现低流速条件下流速增大促进藻细胞生长、高流速条件下流速增大抑制藻细胞生长的规律;试验确定的临界流速为0.4 m/s。

2) 在低流速环境下(流速小于0.4 m/s),流速主要通过改变藻细胞与营养物质的接触频率,间接影响其吸收效率,进而影响藻细胞生长,且紊流流态的促进作用优于层流流态的。

3) 临界流速产生的原因主要是,随着流速增加,流体切应力达到了细胞承载力的阈值,破坏了藻细胞结构,影响藻细胞正常代谢功能,进而抑制其生长。试验条件下,梅尼小环藻在流速0.4 m/s时其细胞出现机械性损伤。

近年来,国内外基于水动力学对藻细胞生长的研究逐渐增多,并取得了一定的研究成果,但已有相关研究多从单一影响因子出发,而实际环境中藻细胞生长是多重影响因素复合作用的结果。今后应充分考虑实际工程情况,探究多因素耦合作用下的藻细胞生长规律;现阶段国内生态水工研究已经逐步成熟,今后应结合输水工程渠道综合研究藻类生长和抑制手段,将抑制藻类生长的机理融入生态水工设计中;基于水动力学对藻细胞生长机理的研究将是未来实际工程中利用流体特性抑制藻类生长的重点所在,具有较为深远的研究价值和实际意义。

参 考 文 献

- [1] HO J C, MICHALAK A M, PAHLEVAN N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s [J]. *Nature*, 2019, 574(7780): 667-670.
- [2] 魏群, 王磊, 马湘蒙, 等. 淡水湖泊蓝藻水华治理对策研究与展望 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(1): 22-30. [WEI Q, WANG L, MA X M, et al. Research status and prospect of management countermeasures for cyanobacteria blooms in freshwater lakes [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(1): 22-30.]
- [3] 朱宇轩, 米武娟, 李波, 等. 南水北调中线干渠两个水工构筑物对着生藻类群落的影响 [J]. *水生生物学报*, 2021, 45(4): 817-825. [HU M R, WANG X H. The influences of two hydraulic structures on periphytic algal communities in the middle channel of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *China Water Resources*, 2021, 920(14): 8-11.]
- [4] REICHWALDT E S, GHADOUANI A. Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: between simplistic scenarios and complex dynamics [J]. *Water Re-*

- search,2012,46(5):1372-1393.
- [5] 康丽娟,朱广伟,邹伟,等. 高温干旱背景下太湖藻情变化特征及机制[J]. 湖泊科学,2023,35(6):1866-1880. [KANG L J,ZHU G W,ZOU W, et al. Dynamics and mechanism of cyanobacterial blooms in Lake Taihu reacted extreme drought and warming[J]. Journal of Lake Sciences,2023,35(6):1866-1880.]
- [6] 张海涵,王娜,宗容容,等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展[J]. 环境科学研究,2022,35(1):181-190. [ZHANG H H,WANG N,ZONG R R, et al. Research progress on influence of hydrodynamic conditions on algal physiology and ecology[J]. Research of Environmental Sciences,2022,35(1):181-190.]
- [7] 颜润润,逢勇,赵伟,等. 环流型水域水动力对藻类生长的影响[J]. 中国环境科学,2008(9):813-817. [YAN R R,ZHANG Y M,ZHANG Y C,ZHANG L J, et al. Influence of circumfluent type waters hydrodynamic on growth of algae[J]. China Environmental Science,2008(9):813-817.]
- [8] MITOVIC S. M, LORRAINE H, FORUGH D. Use of flow management to mitigate cyanobacterial blooms in the Lower Darling River, Australia[J]. Journal of Plankton Research,2011,33(2):229-241.
- [9] ZHU J, LEI X H, QUAN J, et al. Algae growth distribution and key prevention and control positions for the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Water,2019,11(9):1851.
- [10] JIANG L Y,JIANG C,ZHOU W, et al. Effect of water turbulence on the growth of *Microcystis aeruginosa*[J]. Environmental Chemistry,2012,31(2):216-220.
- [11] 张毅敏,张永春,张龙江,等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响[J]. 中国环境科学,2007(5):707-711. [ZHANG Y M,ZHANG Y C,ZHANG L J, et al. The influence of lake hydrodynamics on blue algal growth[J]. China Environmental Science,2007(5):707-711.]
- [12] 刘辉,赵文飞,刘先林,等. 南水北调中线工程高填方渠道 PS-InSAR 形变监测[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(6):1-9. [LIU H,ZHAO W F,LIU X L, et al. PS-InSAR deformation monitoring of high-fill canals of the south-to-north water diversion middle route project[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2023,44(6):1-9.]
- [13] 胡敏锐,王旭辉. 优化供水格局受益人口增至 7900 万南水北调中线工程累计调水 400 亿立方米[J]. 中国水利,2021,920(14):8-11. [HU M R,WANG X H. Optimized water supply pattern benefits 79 million people: Middle Route of South-to-North Water Diversion Project achieves cumulative water transfer of 40 billion cubic meters[J]. China Water Resources,2021,920(14):8-11.]
- [14] 李波,张羽珩,邓睿,等. 流速对梅尼小环藻生长与光合活性的影响[J]. 生态学杂志,2022,41(7):1385-1390. [LI B,ZHANG Y H,DENG R, et al. Effects of water velocity on the growth and photosynthetic activity of *cytotella meneghiniana* (diatom)[J]. Chinese Journal of Ecology,2022,41(7):1385-1390.]
- [15] 李波. 流速对南水北调中线干渠浮游植物群落演替与生长的影响[D]. 大连:大连海洋大学,2022. [LI B. Effects of water velocity on succession and growth of phytoplankton communities in the main canal of the South-to-North Water Diversion Project[D]. Dalian:Dalian Ocean University,2022.]
- [16] XUE R,FU L,DONG S S, et al. Promoting *Chlorella* photosynthesis and bioresource production using directionally prepared carbon dots with tunable emission[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2020,569:195-203.
- [17] 李颖凡. 碱性磷酸酶对针杆藻摄磷的作用及其影响因素[D]. 重庆:重庆大学,2017. [LI Y F. Study on the effect of alkaline phosphatase on P uptake by *synedra* sp. and its influence factors[D]. Chongqing:Chongqing University,2017.]
- [18] 李婷,景元书,韩玮. 不同磷条件下高温胁迫对铜绿微囊藻增殖的影响及其恢复[J]. 环境工程学报,2015,9(10):4780-4788. [LI T,JING Y S,HAN W. Effect of high temperature on cell proliferation and recovery of *microcystis aeruginosa* at different initial phosphatase concentration[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(10):4780-4788.]
- [19] 王玲玲,戴会超,蔡庆华. 香溪河水动力因子与叶绿素 a 分布的数值预测及相关性研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2009,17(5):652-658. [WANG L L,DAI H C,CAI Q H. Numerical prediction of velocity and chl-a in Xiangxi River and correlativity research[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2009,17(5):652-658.]
- [20] 宋洋,张陵蕾,陈旻,等. 流速对水库水华优势种铜绿微囊藻生长的影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(增刊1):25-32. [SONG Y,ZHANG L L,CHEN M, et al. Impacts of flow velocity on growth of dominate species *microcystis aeruginosa* of algae-bloom in reservoirs[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2016,48(S1):25-32.]
- [21] 陈伟民,陈宇炜,秦伯强,等. 模拟水动力对湖泊生物群落演替的实验[J]. 湖泊科学,2000,12(4):343-352. [CHEN W M,CHEN Y W,QIN B Q, et al. Experimental study on the biological community succession caused by water flow[J]. Journal of Lake Sciences,2000,12(4):343-352.]
- [22] MUSIELAK M,KARP-BOSS L,JUMARS P, et al. Nutrient transport and acquisition by diatom chains in a moving fluid[J]. Journal of Fluid Mechanics,2009(638):401-421.
- [23] ZHOU J,QIN B Q,HAN X X. Effects of the magnitude and persistence of turbulence on phytoplankton in Lake Taihu during a summer cyanobacterial bloom[J]. Aquatic Ecology,2016,50(2):197-208.
- [24] WARNAARS T A,HONDZO M. Small-scale fluid motion mediates growth and nutrient uptake of *Selenastrum capricornu-*

- tum[J]. *Freshwater Biology*, 2006, 51(6): 999–1015.
- [25] 陈瑞弘, 李飞鹏, 张海平, 等. 面向流量管理的水动力对淡水藻类影响的概念机制[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 24–30. [CHEN R H, LI F P, ZHANG H P, et al. Conceptual mechanism of hydrodynamic impacts on freshwater algae for flow management[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(1): 24–30.]
- [26] 王娜. 人工紊流对藻类细胞生长、代谢活性和光合作用的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022. [WANG N. Effect of artificial turbulence on the algal cell growth, metabolic activity and photosynthesis[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.]
- [27] 刘任静, 蒋文涛, 徐凯仁, 等. 流体切应力对铜绿微囊藻细胞活性的影响[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(2): 896–903. [LIU R J, JIANG W T, XU K R, et al. Effect of fluid shear stress on activity of microcystis aeruginosa cells[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(2): 896–903.]
- [28] YANG G J, ZHONG C N, PAN W W, et al. Continuous hydrodynamic mixing weakens the dominance of Microcystis: evidences from microcosm and lab experiments[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 29(11): 15631–15641.

Effect of Flow Velocity on Cell Growth and Mechanism Analysis of *Cyclotella meneghiniana*

ZHANG Jianwei¹, MA Hongdong¹, SONG Gangfu², ZHOU Zijun¹, GUO Sitong³, ZHANG Chuanpu⁴

- (1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. School of Ecology and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
3. School of Environmental Science and Security Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
4. Henan Ecological Environment Monitoring and Safety Center, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: **[Objective]** Flow velocity is a significant factor influencing algal cell growth and represents an optimal environmental control factor for suppressing algal proliferation based on hydrodynamic principles. Revealing the growth patterns and influencing mechanisms of *Cyclotella meneghiniana* under different flow velocity conditions is of great significance for preventing algal blooms and exploring the mechanisms of phytoplankton growth under hydrodynamic stress. **[Methods]** This study selected *Cyclotella meneghiniana* cells, the dominant diatoms in the Henan section of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project, as the research object. A flow velocity gradient environment ranging from 0.0 to 1.0 m/s was simulated using self-made experimental devices. By measuring algal cell density, specific growth rate, photosynthetic pigment content, alkaline phosphatase activity, and other indicators, the growth patterns and influencing mechanisms of *Cyclotella meneghiniana* under different flow rates were analyzed. **[Results]** Under the experimental conditions, the critical flow velocity of cells was 0.4 m/s, and its growth exhibited a "low promotion and high inhibition" pattern under different flow environments. At low flow velocity (0.0–0.4 m/s), increased contact frequency between algal cells and nutrients promoted the absorption of nutrients by algal cells. At high flow velocity (0.6–1.0 m/s), fluid shear stress caused varying degrees of mechanical damage to the cell structure, thereby inhibiting algal cell growth. **[Conclusion]** Flow velocity has a dual effect on the growth of *Cyclotella meneghiniana* cells; the critical flow velocity is closely related to the cells' structural tolerance.

Keywords: flow velocity; *Cyclotella meneghiniana*; influencing mechanism; hydrodynamics

(编辑:马伟希)