

环境因子介导细胞表面特性解析铜绿微囊藻群体形成机制

张萍,秦彩红,朱雅芝,熊朝,陈雪梅

(贵州民族大学 生态环境工程学院,贵阳 550025)

摘要:群体的形成对于微囊藻种群优势维持和水华暴发至关重要.以铜绿微囊藻为研究对象,探究其在不同 Ca^{2+} 、N、P 质量浓度以及温度和光照强度下的群体形成情况及机理.结果表明,在高 Ca^{2+} 、低 N、P 质量浓度和高光强条件下均出现了群体, D_{50} 最大分别为 37.45、38.22、23.15 和 36.78 μm .相比各对照组,高 Ca^{2+} 、低 N、低 P、强光和低温条件使结合型胞外聚合物(bound extracellular polymeric substances, B-EPS)含量最大分别升高了 54.77%、50.33%、33.06%、59.80% 和 67.87%; Zeta 电位最高分别升高 47.65%、24.79%、27.61%、8.11%、43.49%.表明这些环境因子可能通过刺激铜绿微囊藻分泌更多的 B-EPS、升高 Zeta 电位等途径改变细胞表面特性,降低细胞间排斥作用来促进铜绿微囊藻聚集.

关键词:蓝藻水华;铜绿微囊藻;群体;环境因子;聚集机制

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2026)04-0009-07

随着全球变暖、大气 CO_2 含量升高以及水体富营养化,蓝藻水华呈现出全球扩张的趋势,其暴发频率增加、强度增大^[1-2].蓝藻水华常为漂浮在水面上的肉眼可见的蓝藻颗粒和浮沫,这不仅影响整体观感,还会影响水体复氧.不少蓝藻能分泌藻毒素,能够引起肝癌等疾病^[3-4].此外,藻细胞及其分泌的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)等藻源有机物不仅会增大给水管道的堵塞风险,还可能在后续消毒过程中发生化学反应,生成毒性更大的消毒副产物^[5-6].2007 年 5 月无锡的自来水危机事件即由太湖暴发的微囊藻(*Microcystis* sp.)水华引起.因此,深入探究蓝藻水华暴发的关键驱动机制,建立高效防控技术体系,已成为当前水生态环境治理的迫切需求.

微囊藻水华是常见的蓝藻水华,常以较大的群体形式存在^[5].群体的形成对于微囊藻种群优势维持和水华暴发至关重要.群体能增强微囊藻细胞对不利环境的适应能力,如抵御浮游动物的牧食^[6],抵御强光^[7]、强的水体扰动或是有毒有害物质^[8]等胁迫影响.群体还能增大浮力,使微囊藻群体上浮至适宜的水层以高效地利用光照和营养.此外,当生存环境缺乏营养时,群体藻细胞周围的 EPS 能作为营养物质供给藻细胞使用^[9-10],以维持其正常的生理活动和生物竞争优势.

微囊藻群体形成是蓝藻细胞生长、分裂和细胞间黏附的结果^[11],该过程受生物与非生物因素双重调控:生物因素(如浮游动物、浮游细菌和藻毒素)通过诱导群体形成以抵御牧食压力或毒性效应^[9-11];非生物因素如氮磷营养盐、光照、温度、 Ca^{2+} 、 Pb^{2+} 等则通过调节细胞生长、胞外多糖分泌及表面特性影响聚集行为^[12-14].肖艳等^[7]认为高光强条件下微囊藻群体形成的机制与光饱和点相关,光饱和点低的微囊藻通过分泌更多的胞外胶被多糖促进群体的形成,而光饱和点高的微囊藻则通过增加细胞分裂来引起微囊藻群体尺寸

收稿日期: 2025-04-28; **修回日期:** 2025-06-15.

基金项目: 国家自然科学基金(42207086).

作者简介(通信作者): 张萍(1990—),女,重庆长寿人,贵州民族大学副教授,研究方向为藻类生理生态, E-mail: zhang-ping890511@163.com.

引用本文: 张萍,秦彩红,朱雅芝,等.环境因子介导细胞表面特性解析铜绿微囊藻群体形成机制[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(4):9-15.(Zhang Ping, Qin Caihong, Zhu Yazhi, et al. Deciphering the mechanism of *Microcystis aeruginosa* colony formation mediated by environmental factors via cell surface property analysis [J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(4): 9-15. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.04.28.0001.)

的增大,Duan 等^[12]研究发现随着温度从 15 ℃ 升高至 25 ℃, *M. wesenbergii* 和 *M. ichthyoblabe* 群体尺寸逐渐增大,但温度继续上升会引起 *M. ichthyoblabe* 群体尺寸的减小,也会使得 *M. wesenbergii* 群体尺寸增大. 这些研究结果表明,不同藻株对环境因子的响应不同,群体形成机制也不尽一致.在众多的环境因子中,筛选出影响常见蓝藻水华藻株群体形成的关键因子对于蓝藻水华的防控具有重要意义.

微囊藻水华是常见的蓝藻水华.本文以铜绿微囊藻为研究对象,系统研究常见环境因子:钙离子、磷、氮、光照和温度对其生长及群体形成的影响,并从表面电性和亲疏水性的角度探索了群体形成的机制,以期对蓝藻水华的防控提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 藻种扩培

藻种购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库,铜绿微囊藻 *M. aeruginosa* (FACHB-905).藻种先置于 1 000 mL 的三角瓶中,在(25±1) ℃、2 500 lx,光暗周期比为 12 h:12 h 的条件下通气扩培至对数生长期.3 000 r/min 离心并用无菌 BG11 培养基清洗 2 遍,重悬后用于实验.

1.2 实验设计

实验设置 10、100、200 和 400 mg/L 4 个钙离子质量浓度梯度,0.05、0.50、2.50 和 5.00 mg/L 4 个磷质量浓度梯度,10、50、100、250 mg/L 4 个氮质量浓度梯度,2 000、4 000、6 000 和 8 000 lx 4 个光照强度以及 15、25、30 和 35 ℃ 4 个温度梯度,每个处理做 3 个平行.实验中的钙离子、磷和氮分别由 CaCl₂、NaNO₃ 和 K₂HPO₄ 提供,试剂均为分析纯.同一因素的几个梯度下铜绿微囊藻细胞接种密度相同,其他培养条件相同.整个实验持续 18 d,实验结束后观察群体形成情况,测定结合型胞外聚合物(bound extracellular polymeric substances,B-EPS)的含量.

1.3 细胞生长、群体大小测定

每 2 d 取样进行计数,采用血球计数板在光学显微镜(CX31,Olympus)下进行计数.若有群体需通过超声 10 min 将群体分散成单个藻细胞.

实验结束后取样观察各条件下群体形成情况.取 0.1 mL 的样品加入浮游植物计数框(0.1 mL)中,随机选取 100 个群体进行拍照.利用 Image J 软件测量群体的最长轴(*L*)和最短轴(*S*)长度,通过如下公式: $D = (L \times S)^{1/2}$,计算群体直径(*D*),并根据累积粒径分布百分数达到 50%时所对应的粒径 *D*₅₀ 值来评估群体大小.

1.4 Zeta 电位、B-EPS 测定

实验第 7 天取微囊藻测定 Zeta 电位.采用马尔文 Zetasizer(Nano ZS90,WORCS,England)对各条件下微囊藻细胞的 Zeta 电位进行测定.测定前,离心收集细胞并将其重悬于质量分数 0.05%的 NaCl 溶液中以对所有样品的离子强度进行标准化,将 pH 值调整为 7.0.B-EPS 提取方法参照 Zhang 等^[15]的方法进行.采用苯酚-硫酸法定量 EPS 含量.

1.5 数据处理

所有数据均以平均值±标准差表示.采用单因素方差分析(ANOVA)和 Turkey 的 HSD 检验来评估数据间的显著性差异.采用 Excel 2016 进行数据处理,图片均通过 OriginLab OriginPro 2018 软件绘制.

2 结果与分析

2.1 不同环境因子对铜绿微囊藻群体形成的影响

不同环境因子影响下 *M. aeruginosa* 群体形成情况见附录图 S1.高质量浓度钙离子、低质量浓度的氮、磷以及高光照强度均引起了 *M. aeruginosa* 的聚集,尤其是 $\rho(\text{Ca}^{2+}) \geq 100 \text{ mg/L}$ 、 $\rho(\text{P}) \leq 0.50 \text{ mg/L}$ 和光强 $\geq 8\,000 \text{ lx}$ 的条件下,第 7 天的微囊藻群体 *D*₅₀ 均大于 30 μm.表明钙离子、磷营养盐和光强可能是影响 *M. aeruginosa* 群体形成的主要环境因子.

随着 Ca²⁺ 升高,*M. aeruginosa* 群体逐渐增大,细胞间结合更加紧密,这与 Wang 等^[16]的研究结果一致.

当 Ca^{2+} 为 400 mg/L 时,群体尺寸最大,可达 63.58 μm 。氮(≥ 100 mg/L)、磷(≥ 2.50 mg/L)质量浓度较高时,*M. aeruginosa* 主要以单细胞的形式存在^[17]。当氮、磷降低至 50 mg/L、0.50 mg/L 时,开始出现群体,但细胞结合松散,表明低质量浓度的氮、磷有助于 *M. aeruginosa* 群体的形成^[17]。随着光强增加至 6 000 lx 即开始出现群体。然而,常见水温条件(15~35 $^{\circ}\text{C}$)下微囊藻均未出现群体,仅可见少量黏液,表明温度对 *M. aeruginosa* 群体形成没有明显影响,然而,研究表明随着温度从 15 $^{\circ}\text{C}$ 升高至 25 $^{\circ}\text{C}$,微囊藻群体尺寸增大,可能是由于所选用的藻株不同^[12]。

2.2 不同环境因子对铜绿微囊藻生长的影响

从图 1(a)可见,10 mg/L 钙离子作用下,*M. aeruginosa* 的细胞密度最高,随着 Ca^{2+} 增加,细胞密度逐渐下降,可能是由于高质量浓度 Ca^{2+} 条件下 *M. aeruginosa* 形成群体(附录图 S1),细胞间相互遮挡,使群体内部微囊藻细胞接收的光较少,抑制了其生长^[10-11]。

不同氮、磷质量浓度下的 *M. aeruginosa* 细胞密度在前 6 d 并无明显差异(图 1(b),1(c)),但从第 8 天开始,低磷和中、高质量浓度氮条件下的细胞密度较高。研究表明,对 *M. aeruginosa* 来说,其生物量增加速度较快的总磷质量浓度区间为:0.005~0.2 mg/L^[3]。在相同磷质量浓度条件下,高氮导致了更高的氮磷比使 *M. aeruginosa* 的细胞密度逐渐升高^[6];10 mg/L 氮培养下的微囊藻细胞密度最低,后期略微发黄,表明出现明显的氮限制。此外,研究发现在磷质量浓度相同时,氮限制会抑制 *M. aeruginosa* 细胞密度的增加,可能是由于低氮条件下蓝藻中的蛋白合成受阻,进而抑制了其增殖^[18]。总体来说,不造成磷限制的低磷条件、中高浓度的氮营养条件有助于 *M. aeruginosa* 的生长,低氮不利于其生长。

光照是蓝藻进行光合作用的能量基础,可影响微囊藻的生长。由图 1(d)可知,2 000 lx 条件下的 *M. aeruginosa* 细胞密度最高,8 000 lx 下微囊藻细胞密度最小,表明强光会抑制 *M. aeruginosa* 生长,可能是由于强光降低了电子传递效率进而抑制光能的转化效率。

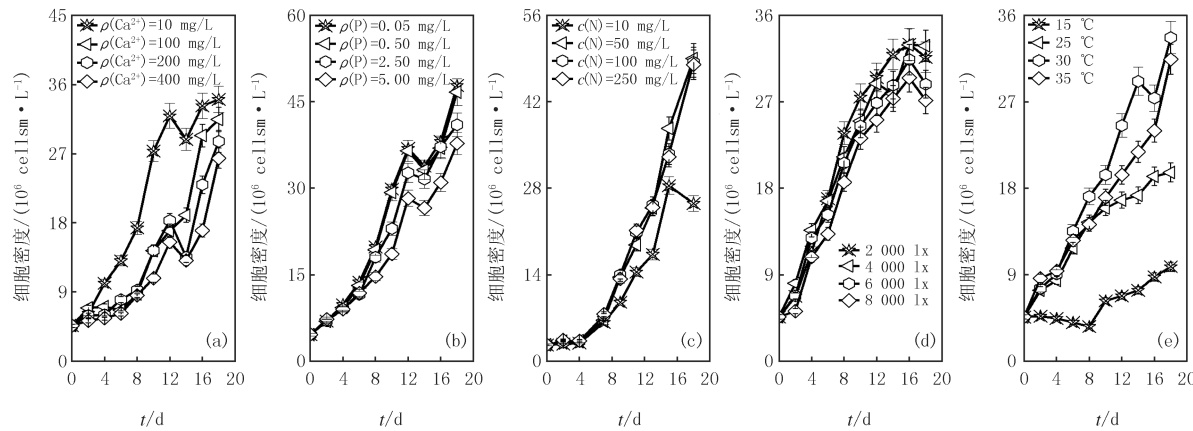


图1 不同环境因子影响下*M. aeruginosa*的生长情况

Fig.1 The growth of *M. aeruginosa* in response to various environmental factors

由图 1(e)可知,30 $^{\circ}\text{C}$ 是 *M. aeruginosa* 生长的最佳温度,15 $^{\circ}\text{C}$ 条件下 *M. aeruginosa* 几乎没有生长,这是因为低温条件下,细胞内酶活性较低,光合作用受到抑制。此外,35 $^{\circ}\text{C}$ 下 *M. aeruginosa* 的生长也受到了一定程度的抑制,这可能是高温胁迫导致光合活性下降^[7],叶绿素合成量减少,类胡萝卜素合成增加^[8];然而,其细胞密度依然高于 20 $^{\circ}\text{C}$ 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 培养下的 *M. aeruginosa*,25~30 $^{\circ}\text{C}$ 的温度更加适合 *M. aeruginosa* 生长。

2.3 不同环境因子对铜绿微囊藻 B-EPS 含量的影响

不同环境因子对单个 *M. aeruginosa* 细胞 B-EPS 含量的影响如图 2。B-EPS 含量随 Ca^{2+} 质量浓度升高呈现出先升高后下降的单峰趋势,200 mg/L 的 Ca^{2+} 下 B-EPS 含量最高,达 0.93 pg/cell。表明高浓度的 Ca^{2+} 能够促进 B-EPS 的分泌,而过高的 Ca^{2+} 反而会抑制 B-EPS 的分泌,这与 Zhang 等^[10] 的结论一致。这可能是由于高质量浓度 Ca^{2+} 降低细胞膜的通透性,阻碍了 EPS 向细胞外分泌^[19]。在低氮、磷条件下,铜绿微囊藻 B-EPS 含量高于中、高浓度的氮、磷条件,且 B-EPS 含量随着氮、磷质量浓度的升高而降低,降幅分别达 23.85% 和 37.42%,这主要是氮、磷营养盐充足时藻细胞主要将光合作用产物转化成细胞增殖所需的蛋白

质、核酸等物质^[20],而营养盐缺乏时则主要合成多糖以抵御胁迫^[21].蓝藻 B-EPS 含量随光照强度的增加而升高,与 Zhang 等^[22]在研究布朗葡萄藻的过程中得到的结论类似,这可能是蓝藻对强光抑制的一种保护作用.随着温度的升高,B-EPS 含量显著降低($P<0.05$),这与肖湘玥等^[23]在研究鱼腥藻对不同温度的响应时也得到了类似的结论,可能是由于高温条件下,*M. aeruginosa* 增殖较快(图 1),也可能是 *M. aeruginosa* 面对低温胁迫的一种保护机制.上述结果表明,在不利于 *M. aeruginosa* 生长的条件下,B-EPS 含量较高,说明 B-EPS 的分泌是蓝藻细胞应对外界不利条件的一种适应性策略.

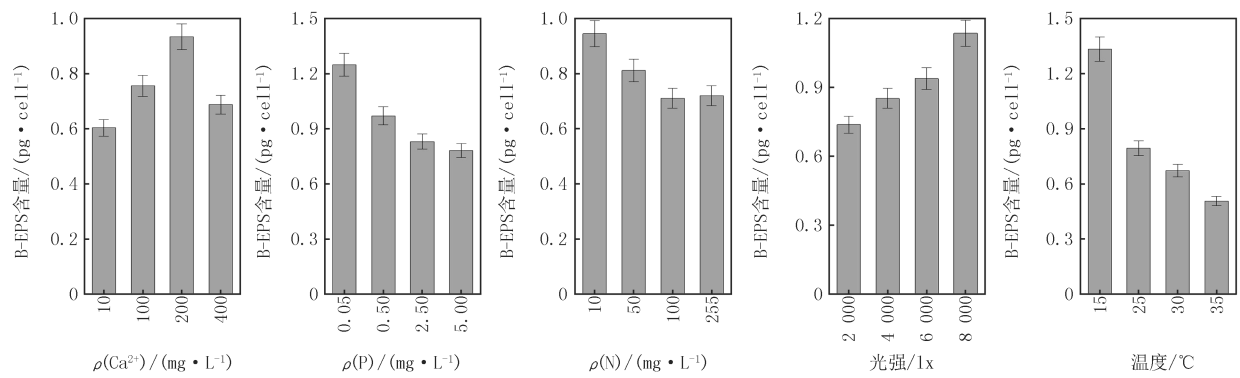


图2 不同环境因子作用下*M. aeruginosa*的B-EPS含量

Fig.2 The content of B-EPS in *M. aeruginosa* influenced by various environmental factors

2.4 不同环境因子对铜绿微囊藻 Zeta 电位的影响

不同环境因子作用下铜绿微囊藻 Zeta 电位的变化如图 3 所示.*M. aeruginosa* 细胞表面均带负电.随着 Ca^{2+} 从 10 mg/L 升高至 400 m g/L,Zeta 电位从 -28.3 mV 逐渐增加至 -15.03 mV ,与 Tan 等^[24]的研究结果一致.低氮、磷条件下藻细胞表面 Zeta 电位明显高于中、高质量浓度氮、磷作用下铜绿微囊藻细胞的 Zeta 电位值,这与低氮、磷条件利于铜绿微囊藻聚集的结论一致.在 2 000~6 000 lx 光照强度条件下,Zeta 电位没有明显变化,然而,8 000 lx 光照条件下铜绿微囊藻 Zeta 电位明显升高,表明,过高光强会使微囊藻的 Zeta 电位升高.此外,藻细胞 Zeta 电位随着温度的升高而降低,当温度从 15 °C 升高至 30 °C 时,铜绿微囊藻 Zeta 电位从 -18.23 mV 降低到 -32.26 mV ,表明高温条件不利于微囊藻的聚集.

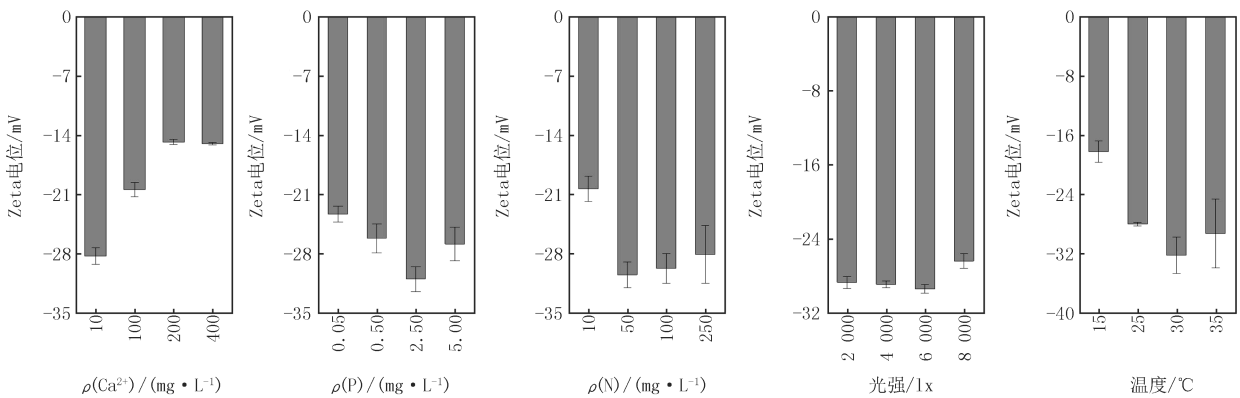


图3 不同环境因子作用下铜绿微囊藻zeta电位的变化图

Fig.3 Variations in the zeta potential of *M. aeruginosa* influenced by various environmental factors

3 讨论

3.1 铜绿微囊藻群体形成与环境因子的关系

结果如图 4 所示,*M. aeruginosa* 群体尺寸与环境中的钙离子浓度具有显著的正相关关系($D_{50} = -0.073\rho(\text{Ca}^{2+}) + 15.56, R^2 = 0.56, P < 0.05$),这与 Zhang 等^[10]的研究结果一致,这是因为钙离子能够中和 *M. aeruginosa* 细胞表面的负电荷,压缩双电层,降低细胞 Zeta 电位(图 3),进而降低细胞间的排斥力,进而促进细胞聚集^[10,25].此外,高质量浓度钙离子还可上调铜绿微囊藻中胞外多糖相关基因的表达,进而促进细

胞聚集和群体形成^[10].氮、磷是藻细胞生长的必要营养元素,该研究中群体形成与氮($D_{50} = -0.073\rho(\text{N}) + 20.89, R^2 = 0.70, P < 0.05$)、磷($D_{50} = -7.20\rho(\text{P}) + 35.54, R^2 = 0.80, P < 0.001$)营养盐含量呈显著的负相关关系,表明低氮、磷营养盐利于 *M. aeruginosa* 群体的形成,这可能是由于低氮、磷胁迫刺激 *M. aeruginosa* 分泌大量B-EPS(图 2),降低了细胞间的排斥作用能^[10].群体尺寸与光照强度(I_{PAR})间表现出显著的正相关关系($D_{50} = 0.006I_{\text{PAR}} - 10.79, R^2 = 0.89, P < 0.001$),这主要是由于高光强促进了铜绿微囊藻 B-EPS 的分泌(图 2),同时, *M. aeruginosa* 的生长并未受到太大影响.适宜温度(25~30 ℃)能够促进 *M. aeruginosa* 的生长,然而,在本研究中,不同温度下 *M. aeruginosa* 却未能形成群体,表明生长和分裂并非群体形成的主要因素,其主要因素还是细胞间吸引能大于排斥能^[10,25],这与 Duan 等^[12]的研究结果不一致,可能是由于所用蓝藻藻株不同,而群体形成机制具有藻株特异性^[7].

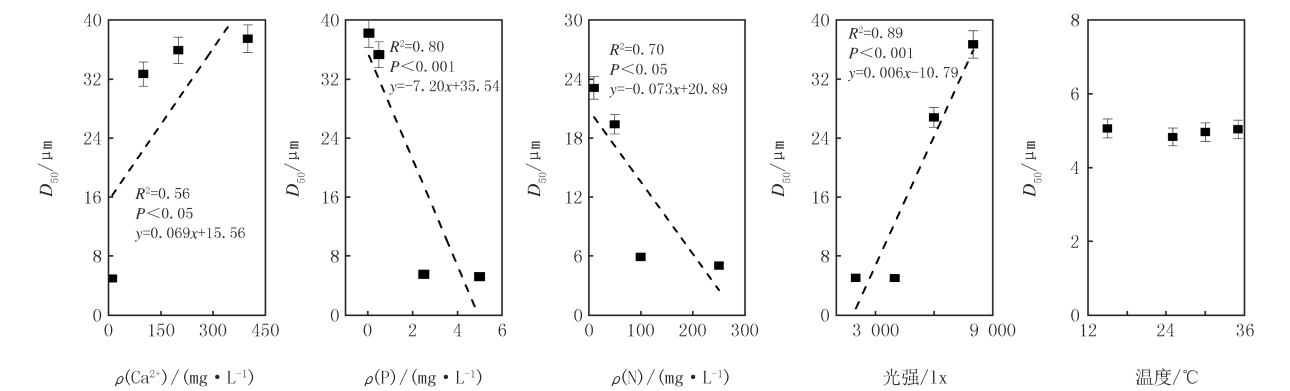


图4 D_{50} 与环境因子的关系
Fig.4 Correlations between D_{50} and environmental factors

3.2 铜绿微囊藻群体形成与细胞表面特性的关系

M. aeruginosa 聚集是细胞间氢键相互作用、共价键相互作用、疏水作用、静电作用和范德华力相互作用的结果^[25],其实质是细胞间的吸引能大于排斥能,最终使得体系能量最低化的过程^[10,25].为进一步探讨细胞表面特性对 *M. aeruginosa* 群体大小的影响,本研究对 *M. aeruginosa* 群体大小与细胞表面特性进行了相关性分析,结果如图 5.

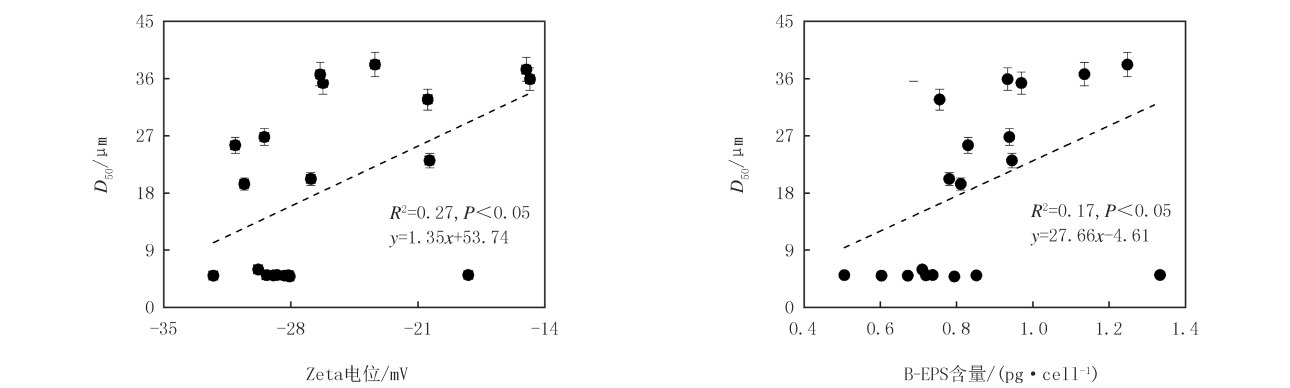


图5 D_{50} 与铜绿微囊藻细胞表面特性的关系
Fig.5 Correlations between D_{50} and the surface characteristics of *Microcystis cells*

微囊藻表面带负电,细胞间的静电排斥力越大,越不利于聚集;Zeta 电位值升高则细胞间聚集倾向增大.结果显示, *M. aeruginosa* 群体尺寸与细胞表面 Zeta 电位具有显著的正相关关系($D_{50} = 1.35\zeta + 53.74, R^2 = 0.27, P < 0.05$),与 Zhang 等^[10]的研究结果一致.此外,细胞聚集是一个能量最低化的过程,B-EPS 中含有大量疏水性官能团,整体呈疏水状态,因此,B-EPS 含量的升高能够增加细胞间的疏水相互作用,降低排斥能和体系整体能量进而促进聚集.该研究中 *M. aeruginosa* 群体尺寸与其 B-EPS 含量间呈显著正相关($D_{50} = 0.069c(\text{B-EPS}) - 4.61, R^2 = 0.17, P < 0.05$).上述结果表明, *M. aeruginosa* 细胞间的聚集与细胞表面特性具有显著的相关性,然而影响聚集的因素众多,这降低了群体尺寸与单个表面特性间的耦合关系,导致群体

尺寸与单个表面特性间的相关度不是很高($R^2=0.27,0.17$).因此,拟合群体尺寸与细胞表面特性间的相关关系需要综合考虑与细胞相互作用相关的各因子,采用更复杂、更全面的拟合模型.

4 结论

- 1)高质量浓度钙离子、低质量浓度的氮磷营养盐和高光强有助于 *M. aeruginosa* 聚集.
- 2)群体大小与 Ca^{2+} 质量浓度($P<0.05$)和光照强度($P<0.001$)呈显著的正相关关系,与氮($P<0.05$)、磷($P<0.001$)质量浓度呈显著负相关关系.
- 3)钙离子、氮磷营养盐、光照强度可能是影响 *M. aeruginosa* 群体形成和水华暴发的主要非生物因子.
- 4)这些环境因子主要是通过刺激 *M. aeruginosa* 分泌更多的 B-EPS、升高 Zeta 电位降低细胞间排斥作用等来促进 *M. aeruginosa* 聚集.
- 5)可在易暴发蓝藻水华的重点湾区布设生态浮岛,通过遮阴效应抑制藻类光能获取和蓝藻水华暴发.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.04.28.0001).

参 考 文 献

[1] Cressey D.Climate change is making algal blooms worse[J].Nature,2017;BFnature201721884.

[2] Hou X J,Feng L,Dai Y H,et al.Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade[J].Nature Geoscience, 2022,15(2):130-134.

[3] Zhang H X,Zhao X,Li Y H,et al.A meta-analysis on the toxicity of microcystin-LR to fish and mammals[J].Environmental Pollution, 2023,330:121780.

[4] 刘洋,张毅杰,章延,等.饮用水处理中藻类混凝消除技术的现状与趋势:基于 CiteSpace 的可视化分析[J].广西师范大学学报(自然科学版),2024,42(6):53-66.

Liu Y,Zhang Y J,Zhang Y,et al.Current status and trends of algal coagulation elimination technology in drinking water treatment;a visual analysis based on CiteSpace[J].Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition),2024,42(6):53-66.

[5] 吴挺峰,秦伯强,马健荣,等.浅水富营养化湖泊中蓝藻群体运动研究述评[J].科学通报,2019,64(36):3833-3843.

Wu T F,Qin B Q,Ma J R,et al.Movement of cyanobacterial colonies in a large,shallow and eutrophic lake:a review[J].Chinese Science Bulletin,2019,64(36):3833-3843.

[6] 扬州,孔繁翔,史小丽,等.棕鞭毛虫牧食作用对铜绿微囊藻形态和生理特性的影响[J].湖泊科学,2008,20(4):403-408.

Yang Z,Kong F X,Shi X L,et al.Grazing effect of Ochromonas sp.on morphological and physiological characteristics of *Microcystis aeruginosa*[J].Journal of Lake Sciences,2008,20(4):403-408.

[7] 肖艳,甘南琴,郑凌凌,等.光强对微囊藻群体形态的影响及其生理机制研究[J].水生生物学报,2014,38(1):35-42.

Xiao Y,Gan N Q,Zheng L L,et al.Studies on morphological responses to light in colonial *Microcystis* and the underlying physiological mechanisms[J].Acta Hydrobiologica Sinica,2014,38(1):35-42.

[8] Natarajan L,Jenifer M A,Peijnenburg W J G M,et al.Algal extracellular polymeric substances(algal-EPS)for mitigating the combined toxic effects of polystyrene nanoplastics and nano-TiO₂ in *Chlorella* sp.[J].Nanotoxicology,2023,17(2):143-156.

[9] Shen H,Song L R.Comparative studies on physiological responses to phosphorus in two phenotypes of bloom-forming *Microcystis* [J].Hydrobiologia,2007,592(1):475-486.

[10] Zhang P,Zhu Y Z,Xiong C,et al.High Ca^{2+} concentrations enhance *Microcystis* colony formation through upregulating polysaccharide-, energy metabolism-,and transmembrane transport-related pathways[J].Harmful Algae,2025,142:102806.

[11] Gan N Q,Xiao Y,Zhu L,et al.The role of microcystins in maintaining colonies of bloom-forming *Microcystis* spp[J].Environmental Microbiology,2012,14(3):730-742.

[12] Duan Z P,Tan X,Parajuli K,et al.Colony formation in two *Microcystis* morphotypes;effects of temperature and nutrient availability[J].Harmful Algae,2018,72:14-24.

[13] Zu Y,Hong S J,Xu C X,et al.Cell wall surface layer(S-layer)promotes colony formation in *Microcystis*:comparison of S-layer characteristics between colonial and unicellular forms of *Microcystis* and function conformation[J].Environmental Science and Pollution Research International,2020,27(34):42254-42263.

[14] Pan J X,Yang Z Y,Hu N,et al.Effect of extracellular polymeric substances on the colony size and morphological changes of *Microcystis* [J].Frontiers in Plant Science,2024,15:1367205.

[15] Zhang P,Zhu S H,Xiong C,et al.Flocculation of *Chlorella* vulgaris-induced algal blooms;critical conditions and mechanisms[J].Environ-

- mental Science and Pollution Research International,2022,29(52):78809-78820.
- [16] Wang Y W,Zhao J,Li J H,et al.Effects of calcium levels on colonial aggregation and buoyancy of *Microcystis aeruginosa*[J].Current Microbiology,2011,62(2):679-683.
- [17] 周健,杨桂军,秦伯强,等.氮磷对铜绿微囊藻群体形态的影响[J].环境科学研究,2014,27(11):1251-1257.
Zhou J,Yang G J,Qin B Q,et al.Effects of nitrogen and phosphorous on colony formation of *Microcystis aeruginosa*[J].Research of Environmental Sciences,2014,27(11):1251-1257.
- [18] Gobler C J,Burkholder J M,Davis T W,et al.The dual role of nitrogen supply in controlling the growth and toxicity of cyanobacterial blooms[J].Harmful Algae,2016,54:87-97.
- [19] Tripathi B N,Gaur J P.Relationship between copper-and zinc-induced oxidative stress and proline accumulation in *Scenedesmus* sp.[J].Planta,2004,219(3):397-404.
- [20] Li M,Zhu W,Gao L,et al.Changes in extracellular polysaccharide content and morphology of *Microcystis aeruginosa* at different specific growth rates[J].Journal of Applied Phycology,2013,25(4):1023-1030.
- [21] Otero A,Vincenzini M.Extracellular polysaccharide synthesis by *Nostoc* strains as affected by N source and light intensity[J].Journal of Biotechnology,2003,102(2):143-152.
- [22] Zhang K,Kojima E.Effect of light intensity on colony size of microalga *Botryococcus braunii* in bubble column photobioreactors[J].Journal of Fermentation and Bioengineering,1998,86(6):573-576.
- [23] 肖湘玥,韩雯睿,于晓涵,等.鱼腥藻响应温度胁迫的形态及生理策略[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(1):135-143.
Xiao X Y,Han W R,Yu X H,et al.Morphological and physiological responses and strategies of *Anabaena* to temperature stress[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(1):135-143.
- [24] Tan X,Shu X Q,Duan Z P,et al.Two types of bound extracellular polysaccharides and their roles in shaping the size and tightness of *Microcystis* colonies[J].Journal of Applied Phycology,2020,32(1):255-262.
- [25] Xu H C,Lü H,Liu X,et al.Electrolyte cations binding with extracellular polymeric substances enhanced *Microcystis* aggregation:implication for *Microcystis* bloom formation in eutrophic freshwater lakes[J].Environmental Science & Technology,2016,50(17):9034-9043.

Deciphering the mechanism of *Microcystis aeruginosa* colony formation mediated by environmental factors via cell surface property analysis

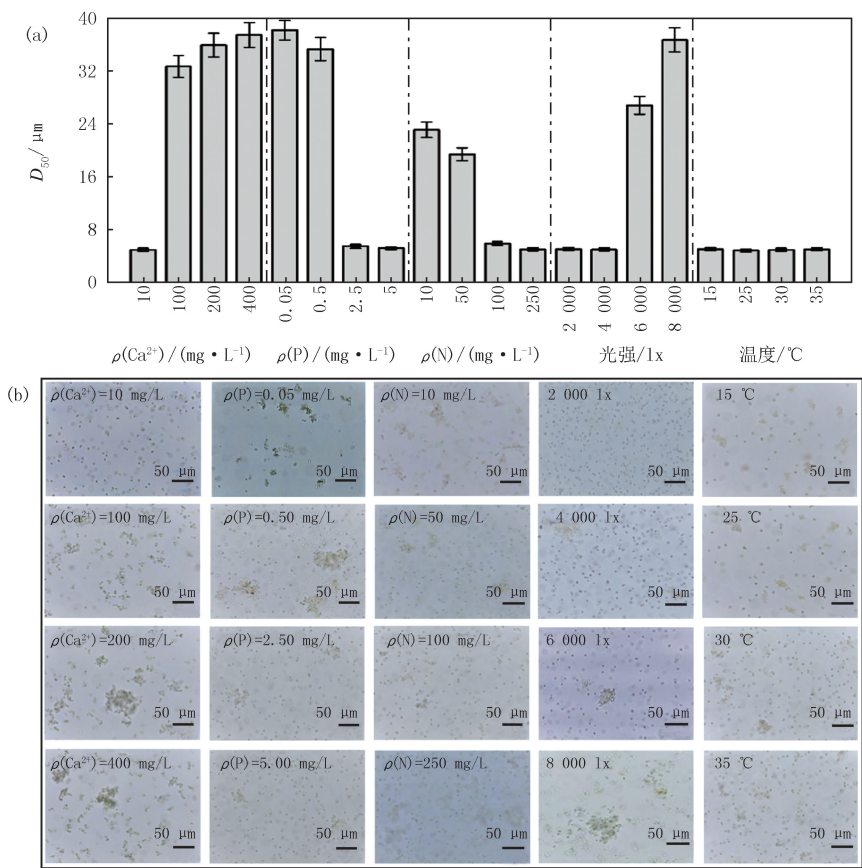
Zhang Ping, Qin Caihong, Zhu Yazhi, Xiong Chao, Chen Xuemei

(College of Eco-Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Colony formation is crucial for the dominance of *Microcystis* species and blooms. The research investigated the impact of Ca^{2+} concentrations, nitrogen(N) and phosphorus(P) concentrations as well as temperatures and light intensities on *M. aeruginosa* colony formation and elucidated the underlying mechanisms. The results demonstrated that *Microcystis* colonies appeared under high Ca^{2+} concentration, low N and P concentration, high light intensity and low temperature conditions, with maximum D_{50} values of 37.45, 38.22, 23.15, and 36.78 μm , respectively. Compared to the control groups, high Ca^{2+} , low N and P, high light intensity, and low-temperature conditions increased the content of bound extracellular polymeric substances(B-EPS) by 54.77%, 50.33%, 33.06%, 59.80%, and 67.87%, respectively, and elevated the Zeta potentials by 47.65%, 24.79%, 27.61%, 8.11%, and 43.49%, respectively. These findings suggest that these environmental factors may promote the aggregation of *M. aeruginosa* by stimulating the secretion of B-EPS, increasing the surface Zeta potentials, and altering cell surface properties, thereby reducing intercellular repulsion.

Keywords: cyanobacterial bloom; *Microcystis aeruginosa*; colony; environmental factors; aggregation mechanisms

[责任编辑 刘洋 赵晓华]



图S1 不同环境因子影响下*M. aeruginosa*群体尺寸(a)及形态(b)
Fig.S1 Colony size(a) and morphology of *M. aeruginosa*(b) under the influence of different environmental factors