doi:10.3969/j.issn.1672-1292.2026.02.007

水杨酸-壳聚糖复合微乳液的抑藻效应研究

王聪慧[1],徐　荧[1,2],韩金玉[1],殷　钰[1],阴　俐[1],李时银[1]

(1.南京师范大学环境学院,江苏 南京 210023)
(2.南京宁亿达环保科技有限公司,江苏 南京 210019)

[**摘要**]　针对蓝藻水华治理中化感物质易流失、抑藻率低等问题,本研究以水杨酸(SA)为抑藻活性成分,壳聚糖(CS)为生物絮凝剂,通过功能协同策略成功合成一种水杨酸-壳聚糖复合微乳液(SA-CS),旨在构建兼具高效絮凝与长效抑藻功能的复合体系,并系统评估其对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的抑制效能及藻毒素(MC-LR)的释放特征. 研究结果表明,通过溶解-再团聚法制备的 SA-CS 在 SA/CS 质量比为 1∶1 时达到最高包封率(50.60%),且在 25 ℃下储存 21 d 未出现相分离或粒径显著变化,表明其具备优异的储存稳定性. 剂量效应实验表明,40 mg/L SA-CS(以 SA 计)处理 24 h 后,铜绿微囊藻的絮凝去除率达 80.91%;持续暴露 14 d 后,藻细胞生长抑制率为 48.35%,极显著高于单一 SA 处理组($p<0.01$). 此外,SA-CS 可有效调控 MC-LR 释放风险,与单一 SA 处理相比,细胞胞内外 MC-LR 总量降低了 23.48%. 本研究证实 SA-CS 兼具物理去除与化感抑制的协同效应,为蓝藻水华治理提供了“快速除藻-长效抑藻-毒素控释”的一体化解决方案,对富营养化水体生态修复具有重要应用价值.

[**关键词**]　铜绿微囊藻,化感物质,复合物,抑藻效能,微囊藻毒素
[**中图分类号**]X524　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1672-1292(2026)02-0057-09

Algicidal Effects of Salicylic Acid-Chitosan Composite Microemulsion

Wang Conghui[1],Xu Ying[1,2],Han Jinyu[1],Yin Yu[1],Yin Li[1],Li Shiyin[1]

(1.School of Environment,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)
(2.Nanjing Ningyida Environmental Technology Co.,Ltd.,Nanjing 210019,China)

Abstract:To address the challenges of the low inhibition rate of algae-inhibiting substances in cyanobacterial bloom control,this study develops a salicylic acid-chitosan composite microemulsion(SA-CS)through functional synergy. Utilizing salicylic acid(SA)as an algicidal agent and chitosan(CS)as a bioflocculant,we aim to construct a dual-functional system capable of efficient flocculation and sustained algal inhibition,while systematically evaluating its inhibitory efficacy against *Microcystis aeruginosa* (*M. aeruginosa*) and regulatory mechanisms on microcystin-LR (MC-LR) release. The SA-CS, fabricated via a dissolution-reassembly method,achieves optimal SA encapsulation efficiency(50.60%)at an SA/CS mass ratio of 1∶1. It exhibits exceptional storage stability,showing no phase separation or significant particle aggregation after 21 days at 25°C. Dose-response experiments demonstrate that SA-CS achieves 80.91% flocculation removal of *M. aeruginosa* within 24 h at 40 mg/L (SA-equivalent dosage), with sustained growth inhibition reaching 48.35% after 14 days, significantly surpassing the performance of standalone SA treatment($p<0.01$). Notably,SA-CS effectively mitigates MC-LR release risks,reducing the total intracellular and extracellular MC-LR by 23.48% compared to SA treatment. This study confirms the synergistic "rapid removal-sustained inhibition-toxin control" effects of SA-CS,offering an integrated solution for cyanobacterial bloom management. The findings advance the design of eco-friendly algicidal agents and provide critical insights for ecological restoration in eutrophic water bodies.

Key words:*Microcystis aeruginosa*,allelochemicals,composite,algal inhibition efficiency,microcystin

在全球变暖和极端气候等多种因素的影响下,全球范围内的蓝藻水华现象日益严重[1-2]. 铜绿微囊藻作为最常见的有害藻类物种之一,频繁引发水华. 当藻细胞死亡或细胞膜通透性增加时,会向水中释放藻

收稿日期:2025-04-21.
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51979137)、江苏省科技计划项目(社会发展面上项目)(BE2023825).
通讯作者:李时银,博士,教授,博士生导师,研究方向:土/水环境中有毒有机污染物迁移转化过程与控制. E-mail:lishiyin@njnu.edu.cn

毒素,这不仅导致生态系统的失衡,还对人类健康构成威胁[3]. 因此,控制铜绿微囊藻的生长对维持水生态系统的安全至关重要.

近年来,鉴于化感物质易于降解、具有显著的抑藻效果以及较高的生态安全性,利用化感物质来抑制铜绿微囊藻的生长已成为该领域的研究热点[4-6]. 在自然水体中,由水生植物分泌的有机酸类化感物质种类最为丰富,其在抑制藻类生长的研究中扮演着关键角色[7-8]. 水杨酸(SA)作为一种酚酸类物质,通过细胞质内的苯丙烷代谢途径以及叶绿体中的异分支酸途径合成,其以直接或糖化/甲基化形式广泛参与植物的生长、发育、繁殖和抗逆境过程[9-11]. 已有研究表明,水杨酸对多种藻类生长有较强的抑制作用[12-15]. 胡利静等发现 0.12 g/L 的水杨酸在 48 h 后对铜绿微囊藻的抑制率达到 95.66%,证明水杨酸具有开发成生物除藻剂的巨大潜能[11]. 然而,有机酸类化感物质在实际应用中存在易流失、所需投加剂量大、抑藻效果差等问题,因此迫切需要通过多种技术的联合应用来提升其除藻效能. 通过把化感物质封装在具有缓释功能的载体上来实现化感物质在水体中的可控释放,从而有效地控制水华藻类生长,是一种治理蓝藻水华长期且有效的方法[16]. 壳聚糖(CS)是一种无毒、可生物降解的天然高分子材料,常被应用于缓释载体的研究[17]. 研究表明,不同浓度的壳聚糖与药物复合可以得到具有缓释/控释药物功能的制剂,有效提高了对药物的生物利用度[18]. 除此之外,壳聚糖也是一种天然有机高分子絮凝剂,具有绿色可降解、絮凝速度快等特点,常被用作绿色絮凝剂,收获微藻以生产生物燃料[19-20]. 因此,利用壳聚糖的缓释和絮凝作用,与化感物质相结合,构建具有缓释功能的抑藻剂,可以为蓝藻水华的防治提供一种新思路.

本文基于前述研究,选取 SA 为典型化感物质,以 CS 为絮凝剂,采用溶解-再团聚法制备水杨酸-壳聚糖复合微乳液(SA-CS),利用 SA-CS 去除水中的铜绿微囊藻,并对藻毒素释放特性及抑藻效果与机制进行深入研究,具体包括:(1)SA-CS 颗粒粒径分布特征及其稳定性;(2)SA-CS 对铜绿微囊藻的化感抑制作用和絮凝去除效能及其作用机制;(3)SA-CS 对铜绿微囊藻细胞内藻毒素(MC-LR)产生和释放特征的影响. 研究成果有望为富营养化水体中蓝藻水华的防治提供理论支持和实践指导.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究使用的铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*,FACHB-905)购自中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库,采用 BG-11 培养基,在温度(25±1)℃、光照强度 4 000 Lux、光暗比 12 h∶12 h 的光照培养箱中培养[21],每天摇动 3 次,实验前将铜绿微囊藻扩大培养到对数生长期. 水杨酸、壳聚糖、氢氧化钠、乙酸购自国药集团化学试剂有限公司,均为分析纯.

1.2 SA-CS 的制备及稳定性实验

将 100 mL 浓度为 2 g/L 的 SA 溶液加入到 250 mL 锥形瓶中,投加 0.2 g CS,置于 300 r/min 的搅拌器上搅拌 5 h 使两者混合均匀,随后滴加一定浓度分散剂,充分搅拌后用 NaOH 溶液调节 pH 至 7 左右,得到 SA-CS. 分别研究 SA 和 CS 的初始用量、溶液 pH 等单因子条件对 SA 包封率的影响,通过设计正交试验,进行因子重要性排序,并找出 SA 包封率较高的最优组合. 收集所制备的复合微乳液,用锡箔纸密封,避光保存备用. 将复合微乳液放置在 25 ℃下恒温箱中,考察第 1、7、14、21 d 时 SA-CS 的 zeta 电位和粒径变化,判断复合微乳液的储存稳定性.

1.3 抑藻实验

将相应质量物质投加到含有 100 mL 藻液的锥形瓶中,设置最终质量浓度分别为 10、20、40、60、80、100 mg/L 的 SA 处理组,2、4、10、16、20、40 mg/L 的 CS 处理组和 2、4、10、16、20、40 mg/L 的 SA-CS 处理组(以 SA 含量计,SA 与 CS 质量比为 1∶1,下同),复合微乳液组记为 C_1、C_2、C_3、C_4、C_5 和 C_6,空白对照组为 CK,每组设置 3 个平行样. 每隔 2 d 测量一次叶绿素 a 的含量、叶绿素荧光参数以及藻细胞密度,以抑制率为相应指标,观测不同剂量 SA、CS、SA-CS 对抑藻效果影响.

1.4 絮凝除藻实验

絮凝沉降实验在置于搅拌器上的烧杯中完成. 首先,将相应质量物质投加到含有 100 mL 藻液的锥形瓶中,设置最终质量浓度为 40 mg/L 的 SA 处理组,40 mg/L 的 CS 处理组和 10、16、20、40 mg/L 的 SA-CS 处理组,空白对照组为 CK,每组设置 3 个平行样,然后以 300 r/min 的转速搅拌 2 min 后,静置使絮体进行

自然沉降,在第 0、0.25、0.5、1、2、8、16、24 h 收集上清液,测定 MC-LR 的浓度,并根据以下公式计算铜绿微囊藻的絮凝去除效率(%)[22]:

$$藻絮凝去除效率(\%)=\frac{F_0-F_t}{F_0}\times 100\%, \quad (1)$$

式中,F_0 为初始的藻密度;F_t 为 t 时刻的藻密度.

1.5 分析方法

取 10 mL 复合微乳液离心(8 000×g,10 min),测定上清液中的物质含量,并计算包封率;叶绿素 a 含量采用乙醇提取法进行测定,具体方法参见文献[23];使用手持叶绿素荧光仪测定铜绿微囊藻悬浮液中叶绿素荧光参数;参照蔡卓平等的方法采用光密度法与计数法同时测定藻细胞密度[24],并计算铜绿微囊藻抑制率;采用液相色谱-质谱联用仪(1290 Infinity LC/6460 QQQ MS,美国 Agilent 公司)测定 MC-LR 的浓度,取 10 mL 藻液离心 30 min(4 ℃,10 000×g),收集上清液测定胞外 MC-LR 的含量,将离心所得藻细胞溶解于 10 mL 75%的甲醇溶液中,24 h 后离心 30 min(4 ℃,10 000×g),收集上清液测定胞内 MC-LR 的含量. 使用 SPSS 26.0 对实验数据进行单因素方差分析(ANOVA)和最小显著性差异(LSD)检验. 本研究在对照组与各处理组之间进行显著性分析,$p<0.05$ 表示有显著性差异(*),$p<0.01$ 表示极显著差异(**).

2 结果与讨论

2.1 SA-CS 的制备条件优化

为优化 SA-CS 的抑藻性能,本文探究了所研究体系中 CS 和 SA 初始浓度及初始 pH 值对体系内 SA 包封率的影响. 正交试验结果如表 1 所示,SA 包封率随 CS 初始浓度的增加呈现先显著升高后轻微降低的趋势,在 CS 浓度为 2 g/L 时达到峰值 50.6%. 当增加 SA 初始浓度时,包封率持续显著提升,并在 SA 浓度为 2 g/L 时获得最高值 50.6%. 同时,包封率随溶液初始 pH 值 5.0~7.0 单调增加,于 pH 7.0 时达到最大值. 综上,最优制备条件确定为 CS 初始浓度 2 g/L、SA 初始浓度 2 g/L、pH 7.0,该条件下 SA 包封率稳定最高(50.6%±1.5%),因此选定此参数体系下制备的 SA-CS 用于后续抑藻性能研究.

表 1 SA-CS 的制备实验正交试验结果

Table 1 Orthogonal experimental results of preparation of SA-CS

序号	初始 CS 用量/(g/L)	初始 SA 质量浓度/(g/L)	pH	包封率
1	1	2	7	16.0%±0.8%
2	2	2	7	50.6%±1.5%
3	4	2	7	49.3%±1.8%
4	2	0.5	7	21.5%±0.9%
5	2	1	7	34.8%±1.2%
6	2	2	7	50.6%±1.5%
7	2	2	5	23.9%±1.0%
8	2	2	6	33.8%±1.3%
9	2	2	7	50.6%±1.5%

2.2 SA-CS 的稳定性

由图 1(a)和(b)可知,SA-CS 的 zeta 电位值在 0-21 d 内的变化范围为 9.22~11.93 mV,室温贮藏 21 d 无分层现象. 使用激光粒度分析仪测定 SA-CS 在 21 d 储存期内的粒径分布变化,如图 1(c)和(d)所示. 在 0-7 d 时 SA-CS 的平均粒径从 1 642 nm 增长到 3 871 nm,这可能是由于 SA-CS 制备初期处于亚稳态. 随着时间增长 SA-CS 粒径变大,7 d 后 SA-CS 平均粒径趋于稳定,7-21 d 储存期内 SA-CS 的平均粒径范围为 2 920~3 871 nm. 在第 1 d 和第 21 d,体系微粒粒径介于 1 000~6 000 nm 范围之间的比率分别为 93.9%和 100%. 结果表明,SA-CS 具有良好的储存稳定性.

2.3 SA 及 SA-CS 对铜绿微囊藻生长的影响

如图 2(a)和(b)所示,实验体系下的化感物质 SA 对铜绿微囊藻的生长有着“低促高抑”的作用. 在低浓度 SA(10 mg/L)作用下,铜绿微囊藻的细胞密度较对照组提高,第 14 d 时,藻密度值为对照组的 1.05 倍. 持续抑藻 6 d 后,高浓度 SA 处理组(40~100 mg/L)作用下的藻密度值较对照组极显著降低($p<0.01$),第 14 d 时,高浓度 SA 处理组对藻细胞的抑制率分别为 27.83%(40 mg/L SA)、43.83%(60 mg/L SA)、64.25%(80 mg/L SA)、74.89%(100 mg/L SA). 这是由于低质量浓度的化感物质可以改变藻细胞通透性,促使培养基中的营养盐被快速吸收利用,进而促进蓝藻生长;而高质量浓度的化感物质则导致藻细胞损伤破裂,并伴随胞内物质流失及细胞凋亡[25-27].

由图 2(c)和(d)可以观察到 CS 对铜绿微囊藻生长的影响. 当质量浓度为 2~16 mg/L 时,CS 在 6-14 d 的培养期内对铜绿微囊藻的生长起促进作用,在第 14 d 时,40 mg/L CS 处理组的藻细胞抑制率为

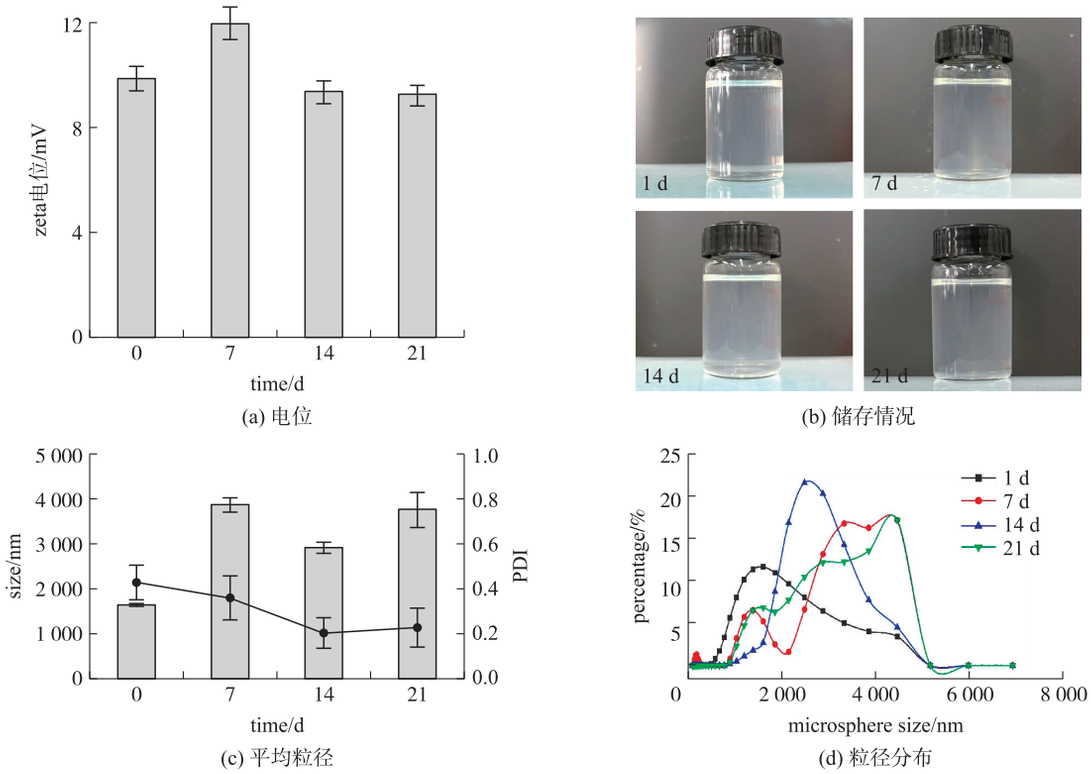


图 1　SA-CS 的 zeta 电位(a)、储存情况(b)、平均粒径(c)和粒径分布(d)

Fig. 1　Zeta potential(a),storage stability(b),average size(c),and particle size distribution(d)of SA-CS

2.80%. 结果表明,实验体系下的 CS 对铜绿微囊藻的生长起促进或轻微抑制作用. 图 2(e)和(f)为不同投加剂量下的 SA-CS 对铜绿微囊藻生长的影响. 培养 14 d 后,当 SA-CS 为 20 mg/L 及 40 mg/L 时藻细胞生长抑制率分别为 35.90%和 48.35%. 而投加剂量较低的实验组(2~10 mg/L)仅在培养第 14 d 时对藻细胞生长抑制率小于 20%. 结果表明,在 40 mg/L 的投加剂量下 SA-CS 对铜绿微囊藻有较强的抑制作用.

为探究 SA、CS、SA-CS 对铜绿微囊藻光合活性的影响,实验测定了 SA、CS、SA-CS 处理后的藻细胞叶绿素 a 含量及 F_v/F_m 值变化. 由图 3(a)可知,SA(10~100 mg/L)处理后的藻细胞 F_v/F_m 值均低于对照组;100 mg/L SA 作用 14 d 后,F_v/F_m 值由 0.411 1 降低至 0.266 0,是此时对照组的 78.82%. 以上结果表明,实验浓度体系下的 SA 对藻细胞的光合活性产生抑制作用,PS II 的电子传递活性逐渐降低. 在相同的 SA 含量下,SA(40 mg/L)及 SA-CS 处理组(40 mg/L)下藻细胞的 F_v/F_m 值在 14 d 后分别为 0.346 3 和 0.292 9(图 3(e)). 由图 3(c)可知在同剂量的 CS 处理下(40 mg/L),14 d 后藻细胞的 F_v/F_m 值降低幅度较 SA 及 SA-CS 处理组小(<20%).

由图 3(b)和(d)可知,SA(20~100 mg/L)处理后的藻细胞叶绿素 a 含量在培养 6-14 d 内均低于对照组,CS(40 mg/L)处理后的藻细胞叶绿素 a 含量在培养 14 d 时为对照组的 86.19%. 由图 3(f)可知,40 mg/L SA-CS 处理后的藻细胞叶绿素 a 含量在 2-14 d 内较对照组显著降低(p<0.05),分别为对照组的 13.10%(2 d)、55.09%(4 d)、48.52%(6 d)、52.61%(8 d)、53.65%(10 d)、56.20%(12 d)、58.50%(14 d). 综上,在 40 mg/L SA-CS 胁迫下,藻细胞叶绿素 a 含量及 PS Ⅱ 最大光化学效率降低,SA-CS 通过影响藻细胞的光合活性而抑制藻类生长.

2.4　SA-CS 对铜绿微囊藻的絮凝去除效果

对铜绿微囊藻投加不同剂量的 SA-CS,研究其对藻絮凝去除效果的影响,如图 4 所示. 图 4(a)为铜绿微囊藻在不同 SA-CS 投加剂量下的藻絮凝去除效率. 投加 40 mg/L SA-CS 及 40 mg/L CS 对藻细胞的絮凝去除率在 24 h 后分别可达 80.91%和 58.14%,而仅投加 SA 的藻细胞去除率只有 11.76%. 由图 4(b)可以看出藻 zeta 电位随时间变化较小,絮凝效果主要归因于 CS 溶液本身具有一定的黏度,且 CS 具有高分子聚合物特有的吸附架桥作用,会使得藻细胞脱稳而絮凝沉降[28-29]. 图 4(c)-(f)为不同 SA-CS 投加量下溶液上清液的粒径变化,在加入 40 mg/L SA-CS 0~8 h 后,上清液中微粒粒径值增大(2 000~6 000 nm),静

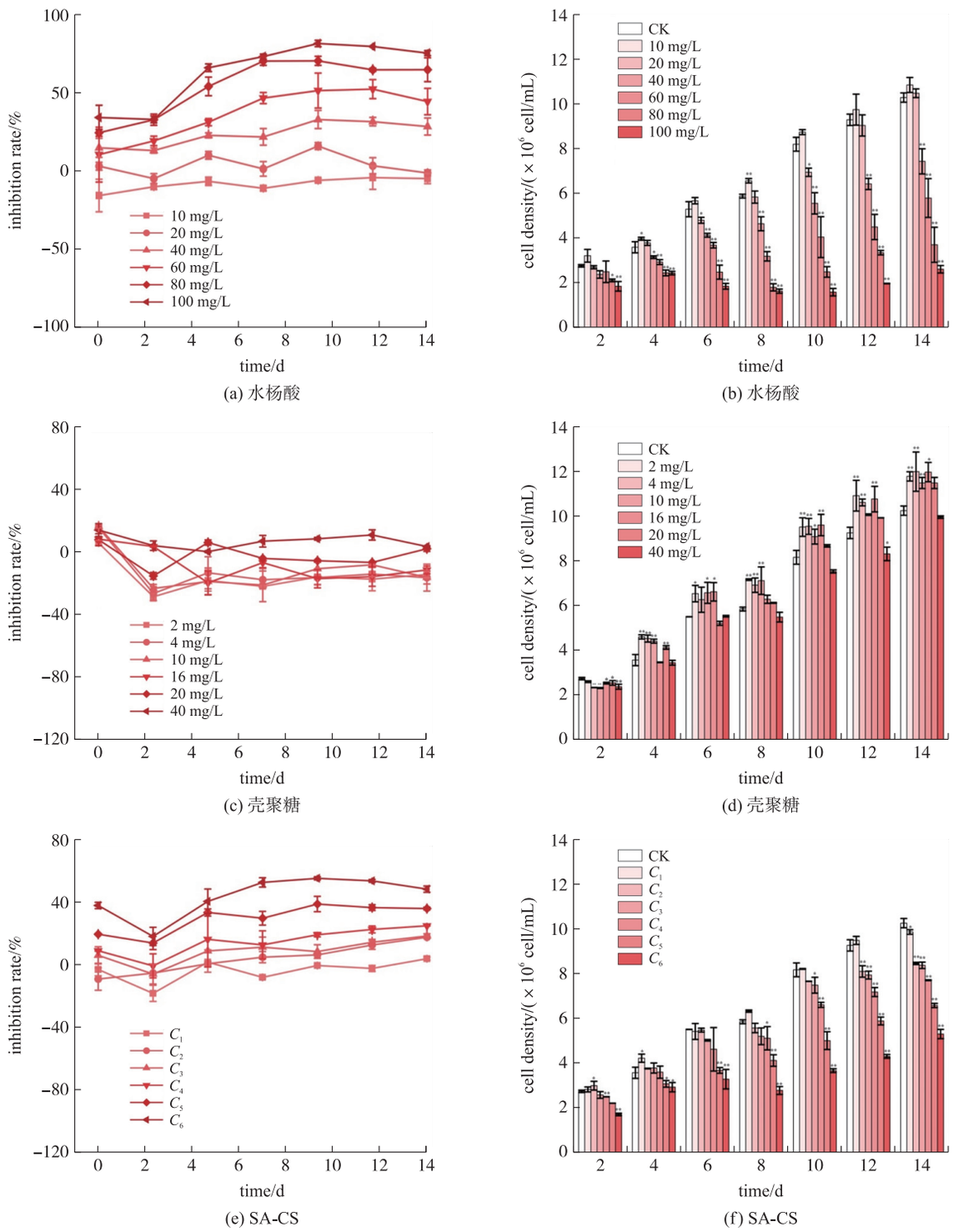


图 2　SA-CS 投加剂量对铜绿微囊藻细胞密度的影响

Fig. 2　Effects of salicylic acid, chitosan, and SA-CS on cell density of *M. aeruginosa*

置 16 h 后,上清液粒径范围下降至 1 000~2 000 nm,表明此时的部分絮凝体已沉降. 以上研究结果表明,与 CS 复合后,SA-CS 对藻细胞的絮凝除藻效率得到提升.

2.5　藻毒素的产生和释放特征

图 5(a)和(b)为 SA 及 SA-CS 处理组胁迫下藻细胞细胞内外 MC-LR 浓度的变化情况. 由图可知,SA 或 SA-CS 胁迫下藻细胞胞外 MC-LR 浓度呈明显的“时间-效应”模式,随培养时间的增长(0-14 d)而增加. 由图 5(a)可知,藻细胞胞外 MC-LR 含量在经 SA 或 SA-CS 处理后增加,在第 8 d 及第 12 d 极显著高于对照组(p<0.01),在第 12 d 分别达到 271.92 μg/L(SA 处理组)和 275.17 μg/L(SA-CS 处理组),超出中国

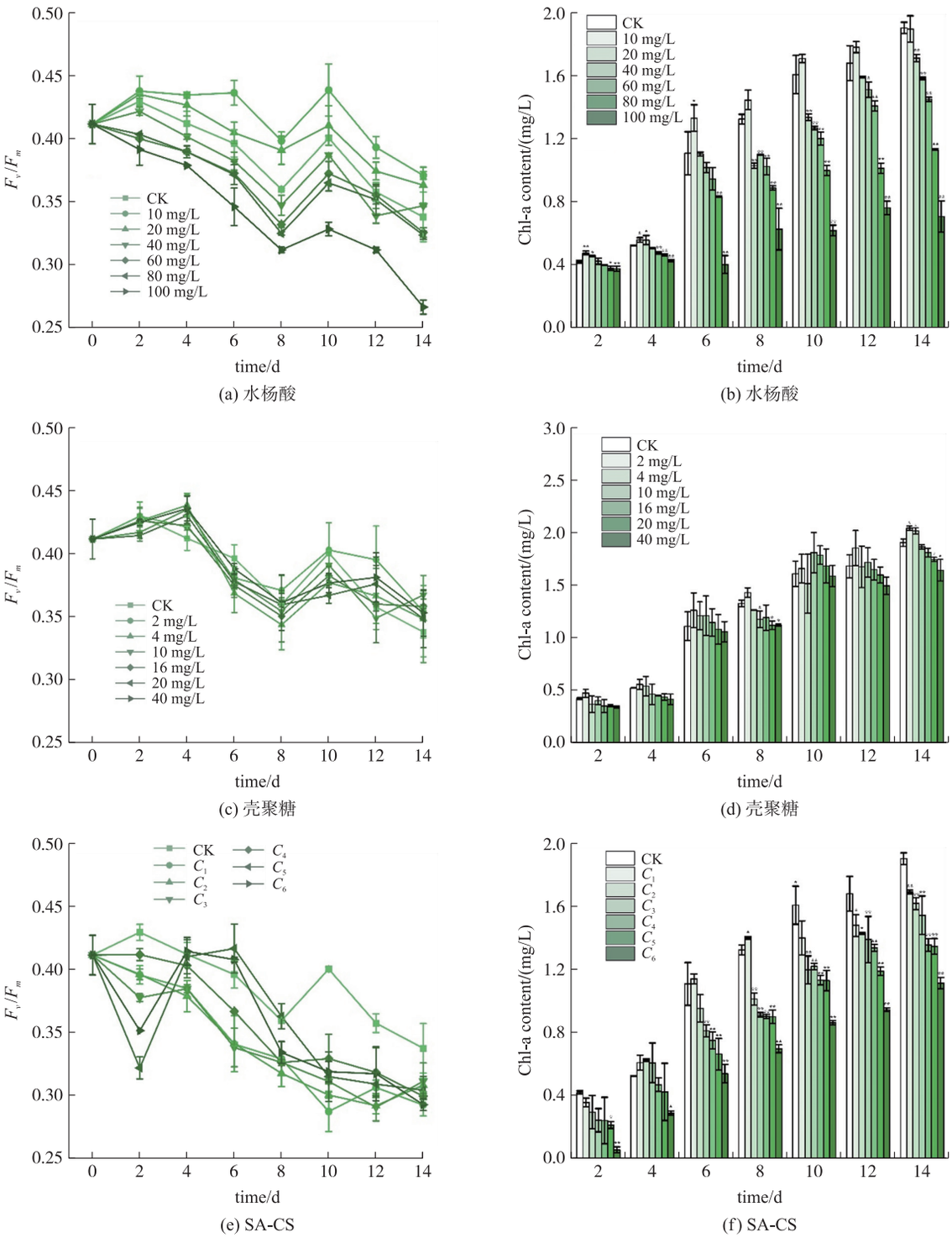


图 3　SA-CS 投加剂量对铜绿微囊藻 F_v/F_m 和叶绿素 a 含量的影响

Fig. 3　Effects of salicylic acid, chitosan, and SA-CS on F_v/F_m and chlorophyll content of *M. aeruginosa* cells

生活饮用水卫生标准中 MC-LR 的限值(1.0 μg/L),有一定的藻毒素释放风险[30]. 在 14 d 的培养时间内,SA 及 SA-CS 处理组与对照组之间的胞外藻毒素含量比值变化呈现先增加后减少的趋势,在暴露第 8 d 时比值最大,胞外藻毒素含量分别为对照组的 1.80 倍(SA 处理组)和 1.82 倍(SA-CS 处理组);而暴露第 14 d 后,分别为对照组的 1.27 倍(SA 处理组)和 1.22 倍(SA-CS 处理组). 以上结果表明,SA 及 SA-CS 处理后的铜绿微囊藻均存在藻毒素的释放风险.

图 5(b)为 SA 与 SA-CS 处理下铜绿微囊藻单位胞内 MC-LR 含量的变化情况. SA-CS 处理后的藻细胞胞内 MC-LR 含量在第 8–14 d 显著高于对照组($p<0.05$);SA 处理后的藻细胞胞内 MC-LR 含量在第 4、第

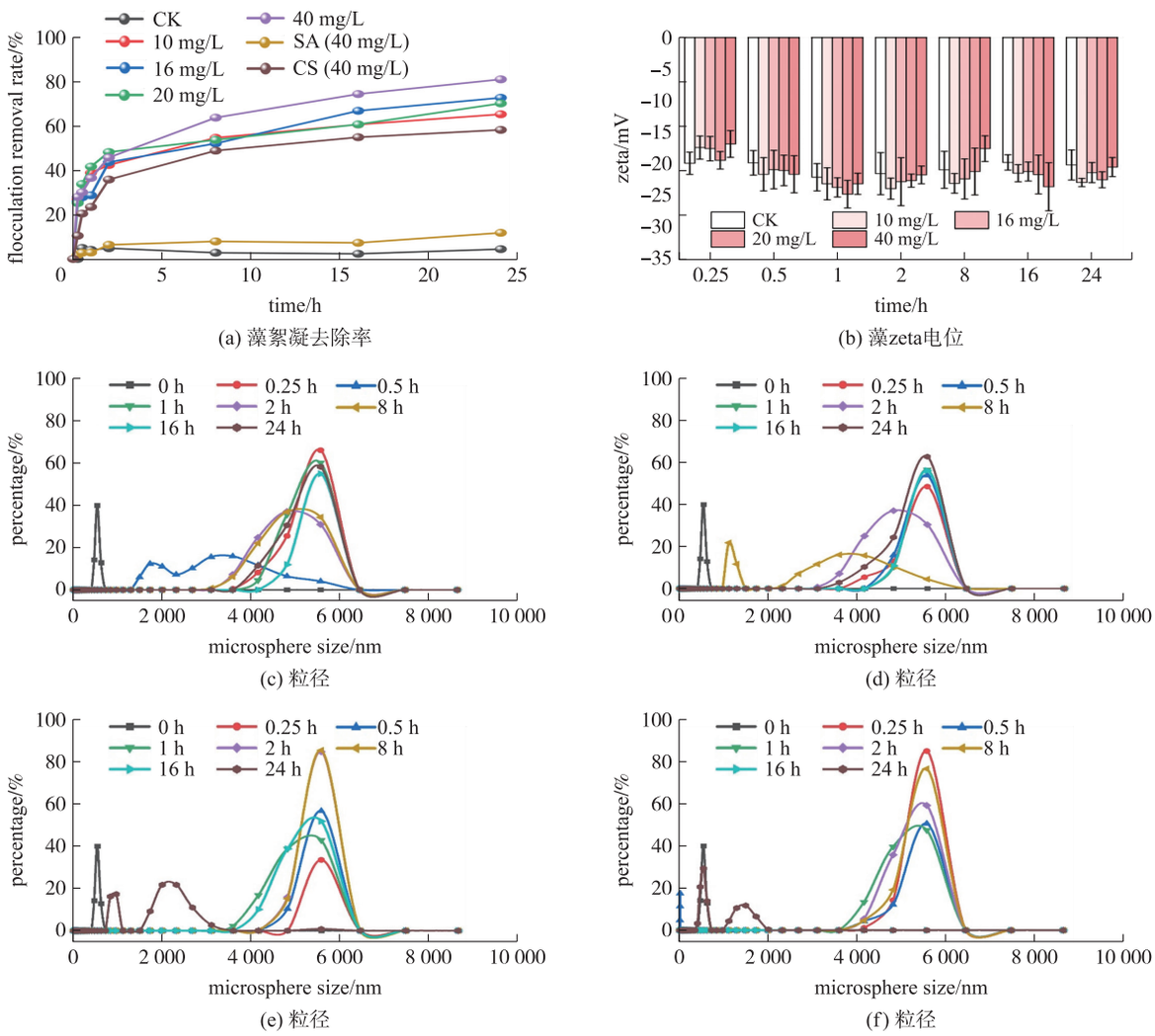


图 4　SA-CS 投加剂量(10、16、20、40 mg/L)对藻絮凝去除率(a)、藻 zeta 电位(b)和粒径(c,d,e,f)随时间的变化

Fig. 4　Changes of algal flocculation removal rate(a),zeta potential(b),and particle size(c,d,e,f) with time under different dosages of SA-CS

14 d 极显著低于对照组(p<0.01),在第 12 d 极显著高于对照组(p<0.01). 除此之外,经 SA-CS 处理后的藻细胞单位胞内 MC-LR 含量高于 SA 处理组,在第 14 d 后分别达到 221.15 fg/cell(SA 处理组)和 291.46 fg/cell(SA-CS 处理组). 综合考虑第 14 d 时 SA 及 SA-CS 处理组下的细胞胞内外藻毒素含量总和,即藻毒素总量(SA:2 435.70 μg/L;SA-CS:1 863.69 μg/L),与单独使用 SA 相比,应用 SA-CS 抑藻/除藻时,可显著降低藻毒素的产生和释放风险.

藻细胞破裂可致胞内藻毒素的释放,实验通过 SEM 观察 SA-CS 胁迫下藻细胞形态结构的变化. 如图 6(a)-(d)所示,在 14 d 的生长周期内,对照组细胞结构完整且表面光滑. 使用 SA-CS 持续抑藻 4 d 时,藻细胞表面出现轻微褶皱,细胞皱缩;SA-CS 持续作用到第 8 d 时,藻细胞结构发生明显变化,大多以絮状碎片呈现;在第 14 d 时,藻细胞完全破裂,细胞形态消失. 实验结果表明,SA-CS 破坏了藻细胞的结构,藻细胞符合坏死样细胞死亡模式,早期细胞质膜保持完整,后期细胞膜和细胞壁破裂,导致细胞内容物泄漏[31-32].

3　结论

本研究通过溶解-再团聚法成功制备了 SA-CS,25 ℃下贮藏 21 d 无分层和颗粒团聚现象,表现出良好的储存稳定性. 40 mg/L SA-CS 在 24 h 内能絮凝去除 80.91%的铜绿微囊藻;持续抑藻 14 d 后,对铜绿微囊藻的生长抑制率可达 48.35%. SA-CS 通过 CS 的絮凝作用实现短时高效除藻,并借助缓释 SA 抑制光合

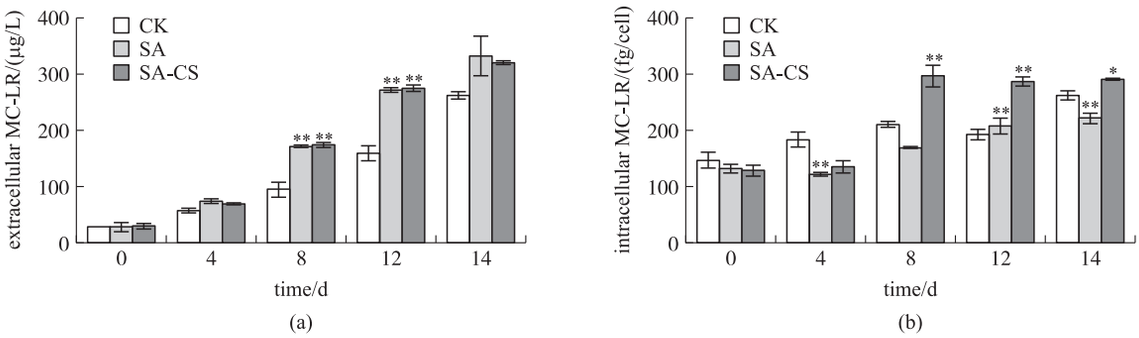


图 5　SA-CS(40 mg·L^{-1})对铜绿微囊藻藻毒素 MC-LR 的影响

Fig. 5　Effects of 40 mg·L^{-1} SA-CS on extracellular MC-LR and intracellular MC-LR of *M. aeruginosa*

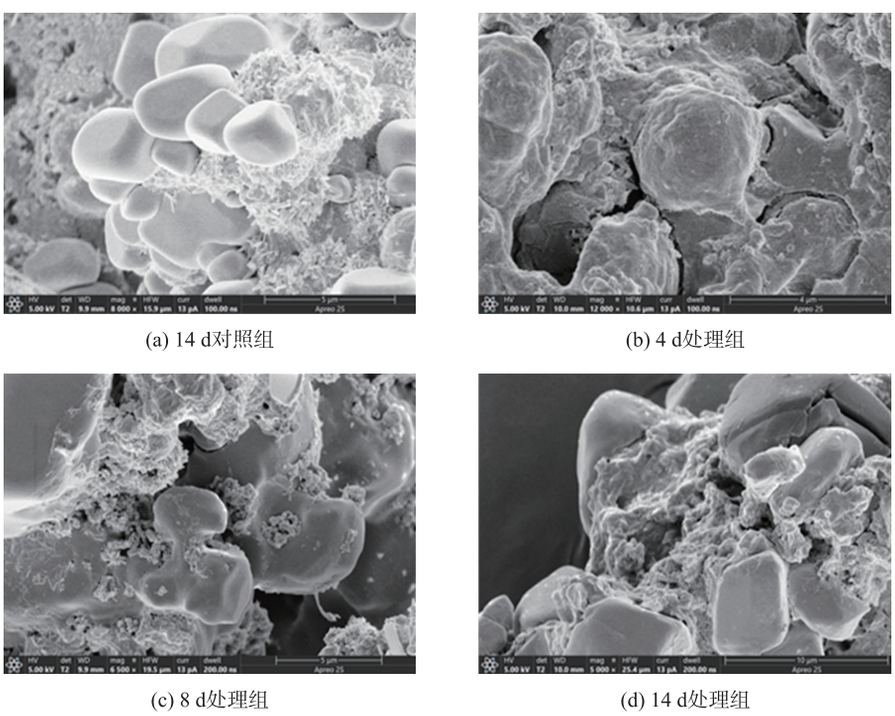


图 6　SA-CS 处理前后藻细胞的 SEM 图

Fig. 6　SEM images of algal cells in 14 days control group, 4 days, 8 days, and 14 days treatment groups

作用,达成对铜绿微囊藻的长效抑制. 在 SA-CS 持续胁迫下,铜绿微囊藻细胞 MC-LR 的产生和分泌特征发生改变,14 d 后,与单一 SA 处理相比,SA-CS 处理(40 mg/L)下的藻细胞胞内外 MC-LR 总量降低了 23.48%,表明使用 SA-CS 对铜绿微囊藻进行抑藻/除藻,可显著降低藻毒素释放的风险.

[参考文献](References)

[1] 刘雪梅,章光新. 气候变化对湖泊蓝藻水华的影响研究综述[J]. 水科学进展,2022,33(2):316-326.

[2] Huisman J, Codd G A, Paerl H W, et al. Cyanobacterial blooms[J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16: 471-483.

[3] 金相灿,李兆春,郑朔方,等. 铜绿微囊藻生长特性研究[J]. 环境科学研究,2004,17(S1):52-54.

[4] 赵倩名,钟佳峻,何培民,等. 黄酮类物质对铜绿微囊藻的抑制效应研究[J]. 环境科学与技术,2022,45(2):1-7.

[5] 李锋民,胡洪营. 植物化感作用控制天然水体中有害藻类的机理与应用[J]. 给水排水,2004,30(2):1-4.

[6] 陈冠祥,汪玉莹. 化感物质提取与抑藻途径研究进展[J]. 环境保护前沿,2024,14(1):142-151.

[7] 钱燕萍,田如男. 水生植物释放的酚酸类化感物质抑藻研究进展[J]. 安徽农业大学学报,2022,49(4):645-651.

[8] Cheng Y S, Li M X, Xu P. Allelochemicals: a source for developing economically and environmentally friendly plant growth regulators[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2024, 690: 149248.

[9] Suzuki T,Fujino T,Namba Y,et al. Acceleration of UV induced thymidine dimer formation by salicylic acid[J]. Free Radical Biology and Medicine,2018,120(S1):S70.
[10] Phetmung H,Sawatdee S. Development of cosmetic cream containing a pharmaceutical cocrystal of salicylic and phenylalanine [J]. International Journal of Applied Pharmaceutics,2019,11(5):1-11.
[11] 胡利静,童桂香,黄光华,等. 水杨酸对铜绿微囊藻的化感抑制作用[J]. 南方农业学报,2017,48(1):169-173.
[12] 吴安平,张庭廷,何梅,等. 水杨酸对水华鱼腥藻的化感抑制作用及相关毒理学的初步研究[J]. 生物学杂志,2008,25(5):44-47.
[13] 刘吉祥,刘芳宇,孙林鹤,等. 聚球藻对酚酸类化感物质的生长和生理响应[J]. 植物资源与环境学报,2021,30(5):10-21.
[14] 熊珍珍,毕永红. 水杨酸对刚毛藻生长的抑制作用[J]. 生态毒理学报,2021,16(6):304-312.
[15] 张诚鹏,朱尧,张仁璇,等. 水杨酸对两种海洋微藻生长及油脂积累的影响[J]. 生物加工过程,2018,16(6):42-46.
[16] Cheng K,Zhao K,Zhang R,et al. Progress on control of harmful algae by sustained-release technology of allelochemical: a review[J]. Science of the Total Environment,2024,918:170364.
[17] Tang X J,Yu C Y,Lei Y Y,et al. A novel chitosan-urea encapsulated material for persulfate slow-release to degrade organic pollutants[J]. Journal of Hazardous Materials,2022,426:128083.
[18] Vo P T,Nguyen H T,Trinh H T,et al. The nitrogen slow-release fertilizer based on urea incorporating chitosan and poly(vinyl alcohol)blend[J]. Environmental Technology & Innovation,2021,22:101528.
[19] Lichtfouse E,Morin-Crini N,Fourmentin M,et al. Chitosan for direct bioflocculation of wastewater[J]. Environmental Chemistry Letters,2019,17:1603-1621.
[20] Chua E T,Eltanahy E,Jung H,et al. Efficient harvesting of *Nannochloropsis* microalgae via optimized chitosan-mediated flocculation[J]. Global Challenges,2019,3(1):1800038.
[21] Ni L X,Rong S Y,Gu G X,et al. Inhibitory effect and mechanism of linoleic acid sustained-release microspheres on *Microcystis aeruginosa* at different growth phases[J]. Chemosphere,2018,212:654-661.
[22] Hou J,Yang Z J,Wang P F,et al. Changes in *Microcystis aeruginosa* cell integrity and variation in microcystin-LR and proteins during tanfloc flocculation and floc storage[J]. Science of the Total Environment,2018,626:264-273.
[23] Ni L X,Acharya K,Ren G X,et al. Preparation and characterization of anti-algal sustained-release granules and their inhibitory effects on algae[J]. Chemosphere,2013,91(5):608-615.
[24] 蔡卓平,段舜山,朱红惠. 光密度法与计数法测定3种能源微藻细胞生长的相关性及其验证[J]. 南方农业学报,2012,43(10):1480-1484.
[25] Wang T T,Liu H C. Aquatic plant allelochemicals inhibit the growth of microalgae and cyanobacteria in aquatic environments [J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30:105084-105098.
[26] 边归国. 浮水植物化感作用抑制藻类的机理与应用[J]. 水生生物学报,2012,36(5):978-982.
[27] Gross E M. Allelopathy of aquatic autotrophs[J]. Critical Reviews in Plant Sciences,2003,22(3/4):313-339.
[28] Agnihotri S A,Kulkarni V D,Kulkarni A R,et al. Degradation of chitosan and chemically modified chitosan by viscosity measurements[J]. Journal of Applied Polymer Science,2006,102(4):3255-3258.
[29] 李永明,于水利,唐玉霖. 壳聚糖絮凝剂在水处理中的应用研究进展[J]. 水处理技术,2011,37(9):11-14.
[30] GB 5749—2022 生活饮用水卫生标准[S].
[31] Lu Z Y,Sha J,Tian Y,et al. Polyphenolic allelochemical pyrogallic acid induces caspase-3(like)-dependent programmed cell death in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*[J]. Algal Research,2017,21:148-155.
[32] Yang K,Chen Q L,Zhang D Y,et al. The algicidal mechanism of prodigiosin from *Hahella* sp. KA22 against *Microcystis aeruginosa*[J]. Scientific Reports,2017,7:7750.

[责任编辑:严海琳]