

填充床放电等离子体反应器对铜绿微囊藻的生长抑制

王翠华, 李国锋, 吴彦*, 王玉

(大连理工大学电气工程系静电与特种电源研究所, 大连 116024)

摘要:研究了放电等离子体反应器中气量和填充固体玻璃球介质对铜绿微囊藻生长抑制和过氧化氢产量、能量与 pH 对藻生长抑制, 以及填充床反应器对藻叶绿素 a 和细胞数的影响。结果表明, 气量的增加和玻璃球介质的填充虽然提高了放电等离子体反应器处理当天对藻生长抑制的效果, 但作用不明显; 而随着处理后放置培养时间的增加, 藻的光密度先略微增加后显著下降, 在气量为 $0.75 \text{ m}^3/\text{h}$ 的填充床放电等离子体反应器中, 处理 40 min 后的样品在放置培养到第 5 d 时, 藻的光密度去除率达到了 87.3%; 过氧化氢产量也随气量的增加和玻璃球介质的填充而得到提高, 尤其是固体玻璃球介质的填充使得放电 40 min 时(气量为 $0.75 \text{ m}^3/\text{h}$), 过氧化氢的浓度即从无添加玻璃球介质时的 $4.6 \mu\text{mol/L}$ 提高到了 $38.3 \mu\text{mol/L}$, 进而提高系统在处理后的放置培养过程中过氧化氢对藻的破坏作用; 向填充床放电等离子体反应器注入的能量越大, 藻生长抑制的效果越明显; 弱碱性处理条件对藻生长抑制的作用比弱酸性明显, 且酸性溶液在处理当天 pH 升高, 碱性溶液降低, 但在放置培养期间均趋于中性; 该填充床反应器对藻叶绿素 a 浓度和细胞数的去除效果显著, 在处理 40 min 后放置培养的第 5 d, 叶绿素 a 浓度和细胞数去除率全部达到 100%。

关键词:填充床放电等离子体反应器; 铜绿微囊藻; 玻璃球; 生长抑制

中图分类号: X703.1; TM89 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)02-0368-07

Growth Inhibition of *Microcystis aeruginosa* in Packed-bed Discharge Plasma Reactor

WANG Cui-hua, LI Guo-feng, WU Yan, WANG Yu

(Institute of Electrostatic and Special Power, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The paper discussed the effect of the gas flow rate and the addition of glass pellets dielectric on the growth inhibition of *Microcystis aeruginosa* (*M. aeruginosa*) and the concentration of hydrogen peroxide, the effect of energy input and pH on the growth inhibition of *M. aeruginosa* and the effect of packed-bed reactor on the algal Chl-a and cell density. The results show that the increasing of the gas flow rate and the addition of glass pellets dielectric enhance the effect of the discharge plasma reactor on the growth inhibition of *M. aeruginosa* immediately after discharge, but the effect is unobvious. The algal optical density slightly increases and then markedly decreases during the incubation period, e.g., the removal efficiency of the algal optical density is high to 87.3% at the end of the fifth day at an air flow rate of $0.75 \text{ m}^3/\text{h}$ after 40 min treatment in the packed-bed discharge plasma reactor. The concentration of hydrogen peroxide is enhanced by the increase in the gas flow rate and the addition of glass pellets dielectric into the discharge plasma reactor, too, especially the concentration of hydrogen peroxide enhanced from $4.6 \mu\text{mol/L}$ to $38.3 \mu\text{mol/L}$ by the addition of glass pellets dielectric, which will enhance the destructive effect of hydrogen peroxide on the algae during the incubation period. The effect of the growth inhibition of *M. aeruginosa* is obvious with the increasing in the energy input into the packed-bed discharge plasma reactor. The effect of the alkaline solution on the growth inhibition of *M. aeruginosa* is more higher than that of the acidic solution, and the value of pH is increased under the acidic condition and decreased under the alkaline condition, but the trend of pH is to be neutral during the incubation period. The decrease of the content of Chl-a and cell density is marked in this reactor, and at the end of the fifth day, the removal efficiencies of Chl-a and cell density are high to 100%.

Key words: packed-bed discharge plasma reactor; *M. aeruginosa*; glass pellets; growth inhibition

由于淡水资源缺乏, 我国一些地方以富营养化的湖泊和水库为饮用水水源^[1,2], 水体的富营养化导致了藻类的过量繁殖, 过量繁殖的藻类给常规净水工艺造成严重影响: 堵塞滤料、滤孔和管道, 妨碍设备的正常运行, 还与微生物、其他杂质构成粘垢, 增加水流阻力^[3~5]. 为防止藻类过量繁殖给水体净化带来一系列问题, 人们常采用化学药剂杀生, 但化学药剂的使用会产生二次污染。

高压脉冲放电等离子体技术是近年来发展起来

的一种低温等离子体产生技术, 早期的研究主要是烟气脱硫脱硝, 降解 VOCs 等, 现发展到废水净化、食品杀菌等领域。水中高压脉冲放电是一个极其复杂的过程, 它不仅能在放电时形成强电场、非平衡等离子体通道, 还能伴随强紫外光辐射; 而等离子体通

收稿日期: 2007-02-13; 修订日期: 2007-05-07

基金项目: 教育部博士点基金项目(2005141002)

作者简介: 王翠华(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为放电水处理, E-mail: wchweiwei@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wuyan@dlut.edu.cn

道中富集了离子、电子、激发态原子、分子(O_3 , H_2O_2)和大量的活性物质($\cdot\text{OH}$, $\text{H}\cdot$, $\text{O}\cdot$ 等)^[6].这些复杂的放电现象能引发一系列的物理、化学和生物反应,破坏物质的化学结构或生理结构,从而达到水处理的目的.目前高压脉冲放电等离子体技术在环保方面的研究,主要集中在以下5个方面:①反应器结构,主要是针(多针)-板、线-板、线-筒以及板-板^[7~10];②放电电源,主要有直流高压电源、交流电源、高频电源和脉冲直流电源;③反应器内物质相态,主要是单相(仅为液体),两相(气液混合体)和三相(气液固混合体)^[11,12],其中三相态的反应器常被称之为填充床放电等离子体反应器;④填充床放电等离子体反应器中的填充物,主要是活性炭,沸石,铁电体以及二氧化钛^[13~16];⑤处理对象,主要是处理染料废水、含酚废水以及水体杀菌等^[17~19].高压脉冲放电等离子体技术处理水的研究热点主要是如何提高的能量利用率和传质效率、延长电极使用寿命等问题.

本研究向气液两相混合体中加入固体玻璃球介质,组成三相放电等离子体反应器或填充床放电等离子体反应器,用双向窄脉冲电源来引发线-筒型介质阻挡放电以提高系统的能量利用率、传质效率、放电稳定性,并延长电极的使用寿命.实验以铜绿微囊藻为处理对象,分析了放电等离子体反应器中气量和填加固体玻璃球介质对藻生长抑制和过氧化氢产量、能量与 pH 对藻生长抑制,以及填充床反应器对铜绿微囊藻叶绿素 a 和细胞数的影响,以期为该方法的未来工业化应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置的系统简图如图 1 所示.反应器的主体构造是直径 65 mm、厚 2 mm、有效长度 230 mm 的高度透明玻璃柱体,其内壁衬有网状的不锈钢作为接地电极.位于圆筒轴心的是直径为 2 mm 的不锈钢高压电极,其外壁套有绝缘玻璃管以防止电极腐蚀.两电极之间是直径为 3~4 mm 的玻璃球作为固体填料层.安装在反应器底端相距 10 mm 处的空气曝气装置,为反应器提供微小的气泡以使气液混合.

水流通过进水阀进入两电极之间,空气通过曝气装置曝入并分散在水中,形成微小的混合良好的气液混合体.处理后的水样和气体分别从出水口和排气阀排出.

双向窄脉冲电源用来提供脉冲能量,可输出峰

值(V_{pp})0~100 kV,脉宽 500~1 000 ns,脉冲上升时间 40~100 ns 的双向窄高压脉冲,脉冲频率 1~200 Hz 可调.电压和电流通过 HV-P60 型脉冲高压探头、TM6303 型电流探头和 HP-54820A 数字示波器记录.

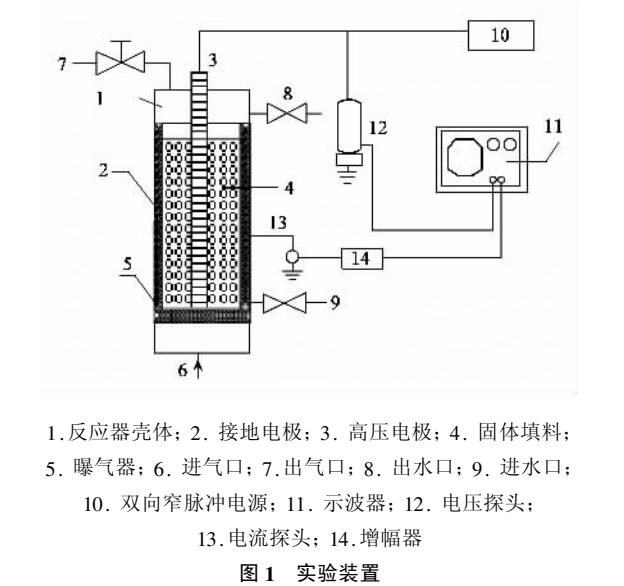


Fig. 1 Diagram of the experimental system

1.2 藻种

实验使用的铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)购自中国科学院武汉水生生物研究所国家淡水藻种库(FACHB),编号为 FACHB-924.采用 BG11 培养液,培养条件为:24℃±1℃,2 500 lx 光照强度,光暗比 L:D=12 h:12 h^[20].

1.3 实验方法

实验前将处于指数期的铜绿微囊藻接种到新鲜的培养基中培养至指数生长期,按藻液与灭菌浓度为 0.85% 的 NaCl 溶液为 1:1 的比例配成一定浓度的藻液为处理水样.实验取 250 mL 稀释后藻液由进水口进入反应器,放电处理不同时间取样后,测定其样品的光密度,叶绿素 a 和细胞数的变化,随后把处理样与空白样(用灭菌浓度为 0.85% 的 NaCl 溶液按照 1:1 的比例稀释处于指数期的藻液,未经实验处理,培养条件与处理样一样)一起放入培养箱中继续培养,每天取样测其光密度、叶绿素 a 和细胞数.每组实验重复 3 次,藻生长抑制效果误差不大于 5%.

1.4 藻细胞光密度的测定

光密度是藻细胞生长量的一个重要指标.通过 U-2800 型紫外可见分光光度计对铜绿微囊藻藻样的全波长扫描,测得在 680 nm 处具有最大吸收峰,故实验选在 680 nm 测定其光密度.

1.5 藻细胞叶绿素 a 的测定

藻样经3 000 r/min离心 20 min 后收集沉淀,用体积分数为 90%的丙酮萃取后置于 4℃冰箱中保存 24 h,然后,在 750、663、645 和 630 nm 处测定吸光度^[21].计算公式如下:

叶绿素 a(mg · L⁻¹) = [11.64(D₆₆₃ - D₇₅₀) - 2.16(D₆₄₅ - D₇₅₀) + 0.10(D₆₃₀ - D₇₅₀)]V/V_g

式中, D₇₅₀、D₆₆₃、D₆₄₅ 和 D₆₃₀ 分别是波长在 750、663、645 和 630 nm 处的吸光度, V 是提取后上清液体积(4.5 mL), V_g是水样体积(5 mL).

1.6 藻细胞数的测定

细胞数采用 XSP-18S 型普通光学显微镜.

1.7 藻灭活效果的计算

铜绿微囊藻去除率(η)的计算公式:

η = (1 - A_t/A₀) × 100%

式中, η 表示铜绿微囊藻的生物量(光密度、叶绿素 a 和细胞数)去除率; A₀ 表示铜绿微囊藻当天或放置培养 t 时间后空白样的生物量; A_t 表示处理 t(min) 时间或放置培养 t(d)时间后铜绿微囊藻的生物量.

1.8 过氧化氢的测定

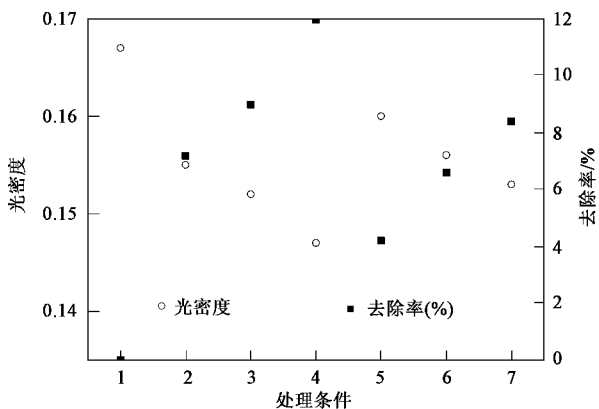
过氧化氢浓度的测定采用文献[22]的方法.

2 结果与讨论

2.1 两相放电等离子体反应器和三相填充床放电等离子体反应器对藻生长抑制的影响

纯水是具有很高介电常数的绝缘体,在水中放电需要很高的电场强度.但当水体中含有气体或颗粒时,放电所需场强降低,放电首先发生在气泡或者颗粒表面.因此,实验考察了铜绿微囊藻在两相和三相放电等离子体反应器以及同一放电反应器中气量变化对处理当天和处理后放置培养过程中藻液光密度的变化情况(如图 2 和 3).由图 2 可知,相同的气量下,处理当天藻的光密度在三相等离子体反应器下降的程度比在两相中相对明显,在处理 40 min 时,藻的灭活率达到 12%;同一放电反应器中,气量的增加也提高了藻的去除;在三相反应器中,当气量从 0.25 m³/h 增加到 0.75 m³/h 时,藻的光密度去除率也从 7.2% 提高到 12%;从去除效果上看,放电处理后,虽然部分藻的生长受到抑制,但总体受抑制的幅度不大.为此,本研究把处理后的样品与空白样一起放在培养箱中继续培养,观察其光密度的变化情况.

从图 3 可知,随着放置培养时间的增加,藻的光



1. 空白样; 2. 玻璃球 + Q_{air} = 0.25 m³/h;
3. 玻璃球 + Q_{air} = 0.5 m³/h; 4. 玻璃球 + Q_{air} = 0.75 m³/h;
5. Q_{air} = 0.25 m³/h; 6. Q_{air} = 0.5 m³/h; 7. Q_{air} = 0.75 m³/h

图 2 两相和三相放电处理当天藻生长抑制的影响

Fig.2 Effect of discharge in two-phase and three-phase mixture on the algal growth inhibition immediately after treatment

密度先稍微增加后大幅度下降.相同气量的情况下 (Q_{air} = 0.75 m³/h),三相反应器处理后的第 3 d,藻的光密度下降到 0.142,两相的下降到 0.157;当放置培养到第 5 d 时,前者的光密度降到 0.062,后者的为 0.131,而控制样的光密度增加到 0.488,去除率分别为 87.3% 和 73.2%.同一放电反应器,气量的增加也提高了藻的去除;当气量从 0.25 m³/h 增加到 0.75 m³/h 时,在放置培养的第 5 d,三相反应器中藻的光密度去除率从 79.7% 提高到 87.3%.从藻光密度的变化情况来看,无论在三相反应器还是在两相反应器中,都不能立即把藻全部灭活,而是在处理后,随着放置培养时间的增加藻细胞逐渐失活而死亡的.

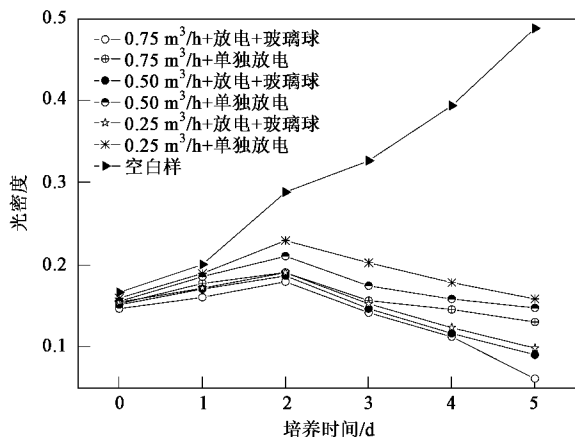


图 3 两相和三相放电处理后放置培养期间藻生长抑制的影响

Fig.3 Effect of discharge in two-phase and three-phase mixture on the algal growth inhibition during the storage after treatment

2.2 两相反应器和三相反应器放电对过氧化氢产量的影响

水中高压脉冲放电能在放电时形成强电场、紫外辐射、冲击波以及活性物质($\cdot\text{OH}$ 、 $\text{H}\cdot$ 、 $\text{O}\cdot$ 、 O_3 、 H_2O_2)等.其中过氧化氢比较稳定,是唯一可能在藻细胞处理后的放置培养中起作用的物质.图 4 为不同气量下过氧化氢在两相和三相反应器中产生情况.由图 4 可知,无论气量为 $0.25\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 还是 $0.75\text{ m}^3/\text{h}$,玻璃球的加入都在很大程度上提高了过氧化氢的产量.两相反应器中,过氧化氢的浓度随气量的增加依次为 2.3 、 3.5 和 $4.6\text{ }\mu\text{mol/L}$,而当玻璃球加入到两相反应器中时,过氧化氢的浓度依次上升到 33.3 、 35.2 和 $38.3\text{ }\mu\text{mol/L}$.同时,随着放电处理时间的增加,过氧化氢的浓度呈线性增加.虽然过氧化氢浓度只有在 mmol/L 水平对正常微生物细胞才有杀灭作用^[23].但本研究中,藻细胞在反应器中由于受到强电场、紫外辐射、冲击波、羟基自由基、氧自由基以及过氧化氢等多重作用,细胞结构受到一定程度的破坏;在放置培养期间,过氧化氢的相对稳定存在加重了藻细胞受破坏的程度,细胞由于不能进行自身修复而逐渐死亡.

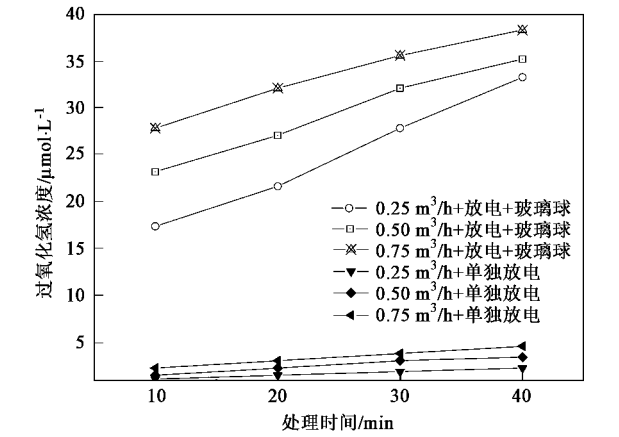


图 4 两相和三相放电对过氧化氢浓度的影响
Fig.4 Effect of discharge in two-phase and three-phase mixture on the concentration of hydrogen peroxide

2.3 填充床反应器中能量对藻生长抑制的影响

为考察放电反应器中能量对藻生长抑制的影响,实验主要测定了电场强度和脉冲频率变化对藻生长抑制的影响.电场强度和脉冲频率对藻在处理当天和处理后放置培养过程中生长受抑制情况分别如图 5 和 6 所示.由图 5 和 6 可知,随着电场强度和脉冲频率的增加,处理当天藻光密度略有下降;在放置培养过程中,随着放置培养时间的增加,空白样与

处理样之间光密度的差值增大,藻生长受抑制的程度随着电场强度和脉冲频率的增加而增加,但增加的幅度不大.

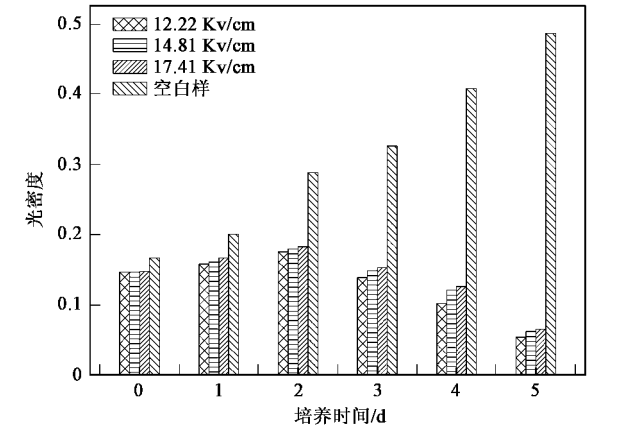


图 5 电场强度对填充床反应器中藻生长抑制的影响
Fig.5 Effect of electrical field on the algal growth inhibition in the packed-bed reactor

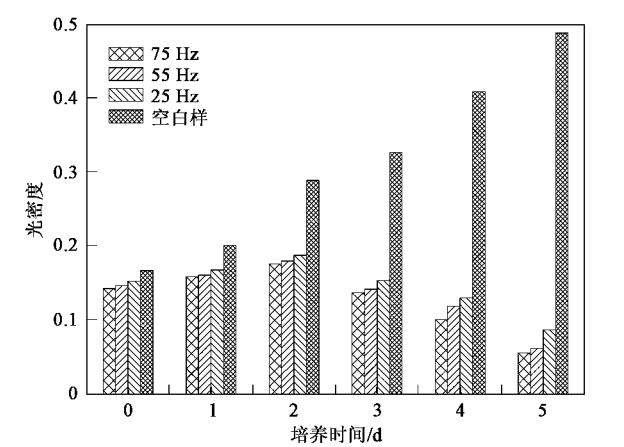


图 6 脉冲频率对填充床反应器中藻生长抑制的影响
Fig.6 Effect of pulse repetitive rate on the algal growth inhibition in the packed-bed reactor

介质阻挡放电的能量计算可用下面的公式^[24]:

$$P = 4fC_d V_c \left[V_{op} - \left(1 + \frac{C_g}{C_d} \right) V_c \right]$$

式中, C_d 是玻璃球、玻璃介质和水的电容之和, C_g 是气泡的电容, V_c 是间隙放电的临界电压, V_{op} 是脉冲电压的峰值, f 是脉冲频率即放电周期的倒数.从上面的公式可以看出,在 C_d 、 C_g 等其他条件一定时,改变其中 1 个因素的数值,电源注入到反应器中的能量就相对改变,如脉冲频率增加,提高了注入到反应器中的能量,使得电场中电子和离子的运动和迁移能力加强,同时也加剧了物质之间的强烈碰撞,

增加了产生活性物质的数量,使得系统对藻处理当天以及放置培养过程中的生长抑制率相对提高.

2.4 溶液 pH 变化对藻生长抑制的影响

铜绿微囊藻最适宜生长的 pH 范围为 7.5 ~ 10.0 的弱碱性环境,当环境的 pH 下降到 5 或 4 时,铜绿微囊藻会因不能适应环境变化而死亡^[25]. 因此,实验考察了较适宜藻生长的 pH(5.82 ~ 10.02) 对该系统放电处理藻的影响以及处理后溶液 pH 的变化(如图 7 和 8). 由图 7 可知, pH 为弱碱性时,无论是处理当天还是处理后放置培养期间,藻细胞生长受抑制程度均比 pH 为弱酸性时高,如 pH 为 10.02 的样品在处理后的第 5 d,藻的光密度去除率达到 88.4%,而 pH 为 5.82 的样品的光密度去除率为 81.8%. 样品在处理前后以及处理后的放置过程中, pH 也有较明显的变化,结果如图 8 所示. 由此可知,处理前为弱酸性的样品在处理当天 pH 有轻微的增加,而处理前为弱碱性的样品在处理当天 pH 有轻微的下降;在放置到第 5 d 时,两者朝相反方向变化,即处理前为弱酸性的样品 pH 增加,处理前弱碱性的样品 pH 下降,但总体的趋势是趋于中性.

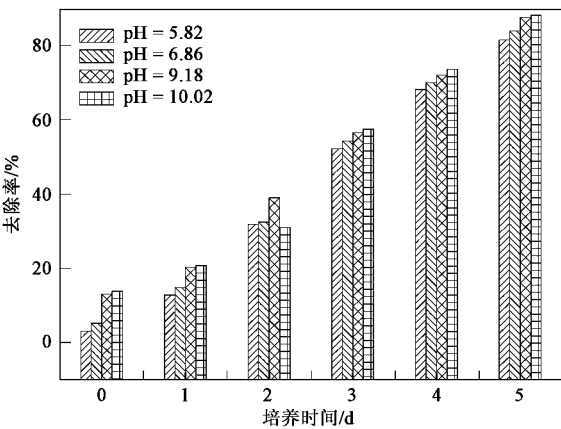
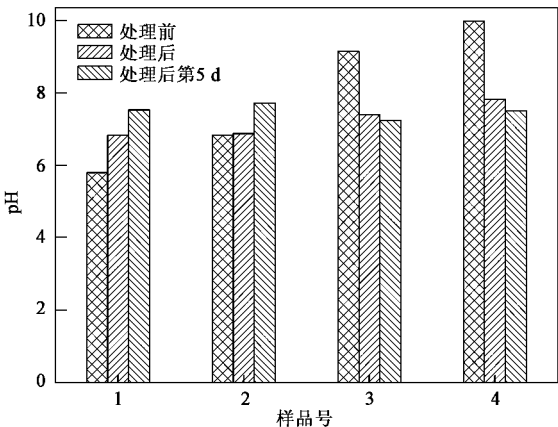


图 7 溶液 pH 对藻生长抑制的影响

Fig.7 Effect of solution pH on the algal growth inhibition

铜绿微囊藻,作为一种自养生物有机体,由于自身代谢活动引起溶液中二氧化碳的消耗,降低了碳酸氢根离子的来源,导致了藻液 pH 的升高. 正常的铜绿微囊藻细胞总能通过自身的调节能力,使得溶液的 pH 向适合自身生长需要的方向调节;但是,当细胞受到破坏时,细胞自身的调节能力下降,藻赖以生存的条件也发生改变,使得藻细胞不能自身修复而逐渐死亡. 藻液 pH 的变化在一定程度上也影响着系统的放电状态,比如,放电产生大量的强氧化性

物质,其中臭氧在酸性条件下比较稳定,但其在碱性条件下,能迅速分解为氧化性更强的羟基自由基,其中一部分羟基自由基合成了稳定的强氧化剂-过氧化氢,而过氧化氢在碱性条件下很不稳定,又分解成羟基自由基^[26]. 因此,在碱性条件下,系统中除了放电产生的其他效应,羟基自由基的量相对增加,进而提高了藻在处理当天生长受抑制程度;处理后,藻液的 pH 值基本趋近于中性,中性条件下过氧化氢的稳定明显好于碱性条件,量相对增加的过氧化氢对藻细胞的持续作用,进一步阻止了藻细胞的自身修复功能,使得其逐渐死亡.



1. pH = 5.82; 2. pH = 6.86; 3. pH = 9.18; 4. pH = 10.02

图 8 放电处理当天与放置培养过程中溶液 pH 变化

Fig.8 Changes in solution pH immediately after treatment and during the storage

2.5 填充床反应器对叶绿素 a 的影响

铜绿微囊藻的光合色素主要包括叶绿素 a 和藻胆素^[27],而叶绿素 a 作为生物量的一种表示方法,其在填充床放电等离子体反应器中的变化如图 9 所示. 由图 9 可知,藻叶绿素 a 的去除率在处理当天相对较低,处理 40 min 只有 31.5% 被去除,但随着处理后放置培养时间的增加叶绿素 a 去除率明显增加;在放置培养到第 5 d,处理 40 min 的样品中叶绿素 a 的去除率已高达 100%,处理 20 min 的样品中叶绿素 a 的去除率也达到了 91.2%.

2.6 填充床反应器对藻细胞数的影响

作为生物量最直观的评价标准,不同处理时间样品的藻细胞数在处理后的放置培养时间增加而变化的趋势如图 10 所示. 由图 10 可知,藻细胞数在处理 40 min、20 min 当天下降相对明显,从 37.967×10^6 个/mL 分别下降到 9.5625×10^6 个/mL 和 13.125×10^6 个/mL;在放置培养过程中样品的细胞数一直处于下

降趋势,培养到第 5 d 时,处理 40 min 的样品已检测不到完整的细胞,处理 20 min 的样品细胞数降为 2.5×10^5 个/mL,而空白样的细胞数上升到 1.382×10^8 个/mL;从细胞数的去除效果来看,处理 40 min 的样品在放置培养到第 5 d 就已经全部去除,去除率达到了 100%.

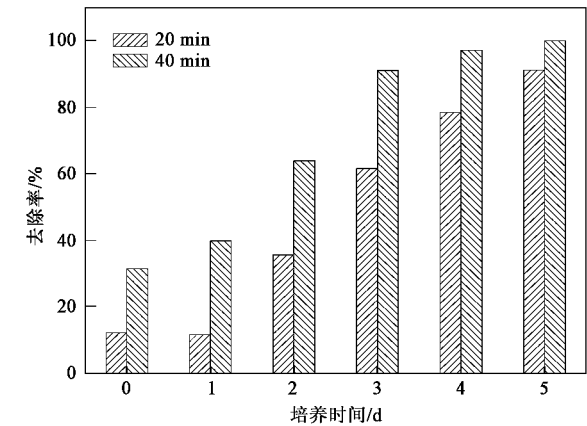


图 9 填充床反应器对藻叶绿素 a 浓度的影响
Fig.9 Effect of packed-bed reactor on the algal Chl-a content

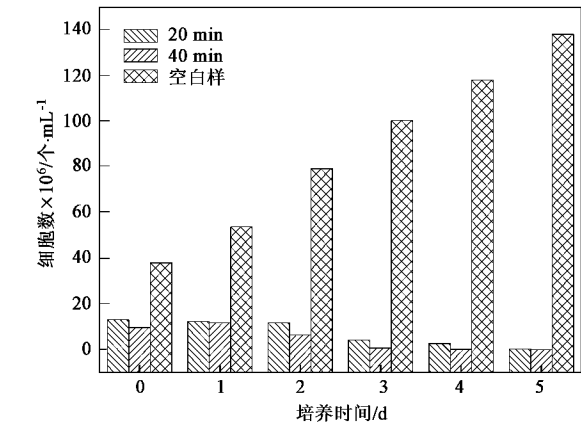


图 10 填充床反应器对藻细胞数的影响
Fig.10 Effect of packed-bed reactor on the algal cell density

3 讨论

上述实验表明:用填充床放电等离子体反应器处理铜绿微囊藻,采用不同生物量考察时,其变化趋势有所差异,但最终的处理效果都非常明显.用光密度和叶绿素 a 来侧面反映藻的生长情况时,处理当天的处理效果不太明显,在处理后放置培养的前 2 d 里,光密度和叶绿素 a 都相对于处理当天有所增加,但培养到第 3 d 时开始下降;其中第 5 d 时叶绿素 a 的去除率高于光密度的,很可能的原因是:叶绿素 a

作为一种细胞内的色素体,在细胞膜破坏后流出,并逐渐被溶液中存在的氧化性物质(如过氧化氢)氧化;而在放置培养的过程中,虽然藻的生长受到严重破坏,细胞内的物质如叶绿素 a 也基本流出,但细胞破碎后的细胞碎片与残体存在而导致叶绿素 a 相对于光密度来讲去除率略高(处理 40 min 放置培养到第 5 d 时,光密度的去除率为 87.3%,而叶绿素 a 的去除率为 100%).用细胞数反映藻的生长时,处理当天和培养过程中的变化趋势和光密度有所差别,处理当天细胞数的下降较明显,在处理后的放置培养过程中,细胞数也一直处于下降趋势.这是因为细胞受放电所产生的电场、紫外辐射、冲击波以及大量活性物质等多重作用后,细胞膜受到严重破坏而产生大量细胞碎片,这些细胞碎片造成光密度下降缓慢,但细胞计数时被计算在外.

4 结论

- (1)通过对气液两相和气液固三相放电等离子体反应器对铜绿微囊藻生长抑制的研究,发现固体玻璃球的填加在一定程度上提高了铜绿微囊藻生长抑制效果和系统产生的活性物质中唯一稳定存在的过氧化氢浓度.固体玻璃球的填加,使得过氧化氢浓度提高了 $33.7 \mu\text{mol/L}$,藻光密度的去除率在气量为 $0.75 \text{ m}^3/\text{h}$,处理 40 min 后的第 5 d 提高了 14.1%.
- (2)增加电源注入到填充床反应器中的能量,提高了铜绿微囊藻生长抑制效果.
- (3)弱碱性条件下,藻生长受抑制的程度比弱酸性强.在放电处理当天,处理前为弱酸性的样品在处理当天 pH 有轻微的上升,处理前为弱碱性的样品有轻微的下降,但在放置培养到第 5 d 时,总体的趋势趋于中性.
- (4)实验结果显示:填充床放电等离子体反应器对铜绿微囊藻表现出很好的去除效果;虽然处理 40 min 的样品在处理当天,藻的叶绿素 a 和细胞数下降不太明显,但随着培养时间的增加,叶绿素 a 和细胞数在放置培养到第 5 d 时去除率均达到了 100%.
- (5)在填充床放电等离子体反应器中,铜绿微囊藻细胞由于受放电所产生的电场、紫外辐射、冲击波以及大量活性物质等多重作用后,细胞膜受到严重破坏,而后在放置培养期间,受到破坏的藻细胞又在稳定的强氧化剂-过氧化氢作用下,由于不能自身修复而逐渐死亡.

参考文献:
[1] 丁忠土,陈航.绍兴市饮用水水库水源营养化状况调查[J].中国公共卫生,2006,22(9):1144.

- [2] 杨文进. 富营养化湖泊水的饮用水处理[J]. 长江建设, 1999, **24**(2): 38.
- [3] Hargensheimer E E, Watson S B. Drinking water treatment options for taste and odor control [J]. Water Research, 1996, **30**(11): 1423-1430.
- [4] Graham N J D, Wardlaw V E, Perry R, *et al.* The significance of algae as trihalomethane precursors [J]. Water Science Technology, 1998, **37**(2): 83-89.
- [5] Hoehn R C, Barnes D B, Thompson B C, *et al.* Algae as sources of trihalomethane precursors [J]. Journal of the American Water Works Association, 1980, **72**(6): 344-350.
- [6] Clements J S, Sato M, Davis R H. Preliminary investigation of prebreakdown phenomena and chemical reactions using a pulsed high voltage discharge in water [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, **IA-23**(2): 224-235.
- [7] Sunka P, Babicky V, Clupek M, *et al.* Generation of chemically active species by electrical discharges in water [J]. Plasma Sources Science and Technology, 1999, **8**(2): 258-265.
- [8] Sun B, Sato M. Use of pulsed high-voltage discharge for removal of organic compounds in aqueous solution [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, **32**(15): 1908-1915.
- [9] Sunka P. Electrical discharges in water and their application [J]. Physics of Plasma, 2001, **8**(5): 2587-2594.
- [10] Chalmers I D, Zanella L, Macgregor S J, *et al.* Ozone generation by pulsed corona discharge in a wire cylinder arrangement [J]. IEE Colloquium on Electro-Technology for Waste Processing and Purification, 1994, **6**: 1-4.
- [11] Zhang R B, Wu Y. Plasma induced degradation of Indigo Carmine by bipolar pulsed dielectric barrier discharge (DBD) in the water-air mixture [J]. Journal of Environmental Science, 2004, **16**(5): 808-812.
- [12] Zhang R B, Wu Y, Li G F. Enhancement of the plasma chemistry process in a three phase discharge reactor [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2005, **14**(2): 308-313.
- [13] Oda T, Takahashi T, Kohzuma S. Decomposition of dilute trichloroethylene by using nonthermal plasma processing-frequency and catalyst effects [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, **37**(4): 965-970.
- [14] Ao C H, Lee S C. Enhancement effect of TiO_2 immobilized on activated carbon filter for the photodegradation of pollutants at typical indoor air level [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, **44**(3): 191-205.
- [15] Eliasson B, Liu C J, Kogelchitz U. Direct conversion of methane and carbon dioxide to higher hydrocarbons by using catalytic dielectric-barrier discharges with zeolites [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2000, **39**(5): 1221-1227.
- [16] Mizuno A, Yamazaki Y, Ito H, *et al.* AC energized ferroelectric pellet bed gas cleaner [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, **24**(3): 535-539.
- [17] Malik M A, Ubaid-ur-Rehman, Ghaffar A, *et al.* Synergistic effect of pulsed corona discharges and ozonation on decolourization of methylene blue in water [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2002, **11**(3): 236-240.
- [18] Willberg D M, Lang P S, Hochemer R H, *et al.* Degradation of 4-chlorophenol, 3, 4-dichloroaniline, and 2, 4, 6-trinitrotoluene in an Electrohydraulic Discharge Reactor [J]. Environmental Science and Technology, 1996, **30**(8): 2526-2534.
- [19] Malik M A, Abdul G, Salman A M. Water purification by electrical discharges [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2001, **10**(1): 82-91.
- [20] Allen M M, Stanier R Y. Growth and division of some unicellular blue-green algae [J]. Journal of general microbiology, 1968, **51**(2): 199-202.
- [21] 俞毓馨, 吴国庆, 孟宪庭, 等. 环境工程微生物检验手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 169-177.
- [22] Joshi A A, Locke B R. Formation of hydroxyl radicals, hydrogen, peroxide and aqueous electrons by pulsed streamer corona discharge in aqueous solution [J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, **41**: 3-30.
- [23] Alam Z B, Otaki M, Furumai H, *et al.* Direct and indirect inactivation of *Microcystis aeruginosa* by UV-radiation [J]. Water Research, 2001, **35**(4): 1008-1014.
- [24] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996. 318-323.
- [25] 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**(增刊): 52-55.
- [26] Sato M, Ohgiyama T, Clements J S. Formation of chemical species and their effects on microorganisms using a pulsed high voltage discharge in water [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1996, **32**(1): 106-112.
- [27] Chow C W K, House J, Velzeboer A, *et al.* The effect of ferric chloride flocculation on cyanobacterial cells [J]. Water Research, 1998, **32**(3): 808-814.