

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.03.019



NaClO 与 KMnO₄ 氧化对针杆藻灭活特性研究

张梦然^{1,2}, 姚娟娟¹, 杨峰¹, 范培震¹, 张智¹, 张咏雪¹, 陈龙甫¹, 郎海³

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 成都市自来水有限责任公司, 成都 610031; 3. 中国华西工程设计建设有限公司, 成都 610031)

摘要:以针杆藻(*Synedra sp.*)为研究对象,考察了 NaClO 与 KMnO₄ 在不同投量和不同 pH 条件下对针杆藻的灭活特点以及对光合活性的影响。结果表明,在 0~5 mg/L 投加范围内,NaClO 对针杆藻的灭活效果随剂量的增大而提高,投加量为 3 mg/L 是抑制藻活性的最佳投量,并且在酸性条件下 NaClO 能更好的发挥其氧化降解的作用;KMnO₄ 对针杆藻的降解效果不明显,说明投加 KMnO₄ (≤5 mg/L) 对针杆藻没有很好的灭活效果。氯化对针杆藻灭活效果好,但是会造成细胞解体,引起藻内有机物的释放,危及饮用水安全。

关键词:针杆藻; NaClO; KMnO₄; 灭活; 光合活性

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)03-0142-09

Inactivation efficiencies of *synedra sp.* by NaClO and KMnO₄ oxidation

ZHANG Mengran^{1,2}, YAO Juanjuan¹, YANG Feng¹, FAN Peizhen¹,

ZHANG Zhi¹, ZHANG Yongxue¹, CHEN Longfu¹, LANG Hai³

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Ministry of Education Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Area and Ecological Environment, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Chengdu Municipal Waterworks Co., Ltd, Chengdu 610031, P. R. China; 3. China Huaxi Engineering Design & Construction Co., Ltd, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: The inactivation efficiencies of *Synedra sp.* by NaClO and KMnO₄ oxidation were investigated. The results indicated that in the range of 0~5 mg/L in the neutral condition, the inactivation efficiencies increased with the increase of NaClO dosage and the optimum dosage was 3 mg/L. Meanwhile NaClO

收稿日期: 2014-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51108481); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102001-003); 中央高校基本科研业务费(CDJRC11210002、106112012CDJZR210027); 污染控制与资源化国家重点实验室开放课题(PCRRF12021)。

作者简介: 张梦然(1988-), 女, 主要从事水处理技术研究, (E-mail) zmr882014@163.com.

姚娟娟(通讯作者), 女, 博士, 副教授, (E-mail) yjj2002.163@163.com

Received: 2014-10-25

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51108481); National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2012ZX07102001-003); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (NO. CDJRC11210002、106112012CDJZR210027); The Open Project Program of the State Key Laboratories of China (NO. PCRRF12021); The Open Fund of Large Instruments and Equipment of Chongqing University

Author brief: Zhang Mengran(1988-), main research interests: water treatment, (E-mail) zmr882014@163.com.

Yao Juanjuan(corresponding author), PhD, associate professor, (E-mail) yjj2002.163@163.com

showed a better degradation ability in acidic condition. The degradation ability of KMnO₄ was not significant, indicating that KMnO₄ had no effect on inactivation. Chlorination was effective for *Synedra sp.* inactivation, and however led to cell disintegration and organic matter release, thus endangering the safety of drinking water.

Key words: *Synedra sp.*; NaClO; KMnO₄; inactivation; photosynthetic activity

近年来,中国河流、湖泊富营养化情况严重,水华频发。作为中国重点水域的三峡库区,由于三峡工程的周期运行使得库区的水文、水环境等较蓄水前发生了巨大的变化,库区支流河道型的硅藻“水华”现象时有发生,严重影响了供水安全^[1-3]。硅藻的控制已经成为一个亟待解决的热点问题。与湖泊型水库的典型的蓝绿藻水华不同,三峡库区多以硅藻水华为主,尤以硅藻属的针杆藻水华最为严重,约占总数的85%。从藻类的生理结构而言,硅藻为真核藻类,其细胞、细胞壁结构(外层为二氧化硅,内层为果胶质,对不利环境具有一定的抵御能力)、光合作用系统构成上均与原核类的蓝藻有着明显的区别。而目前关于净水厂灭藻技术的研究以蓝绿藻为主^[4-6],如化学药剂法、紫外线法、超声波法等,硅藻在灭活机制和效能上可能有别于蓝藻,因此,抑制硅藻类的活性并减少其对供水安全的影响具有重要的研究价值。

在各种灭藻技术中,预氯化是应用最广泛的方法,它能增强对藻类细胞的去除^[7]。目前,对蓝藻细胞的氯化效果已经有很好的研究^[8-10]。高锰酸钾预处理能有效控制不好的气味和味道并抑制生物生长,它还能提高混凝效果并且控制消毒副产物的生成^[11-12],有学者对高锰酸钾作为预处理药剂对藻的去除进行研究也得到了较为不错的结果^[13]。有研究表明,NaClO、KMnO₄会对蓝藻的光合作用活性产生负面影响^[14],导致蓝藻细胞的死亡。在过去的研究中已经证实,脉冲调幅(PAM)荧光测定术能很好的检测光合作用的PSII阶段,表征蓝藻细胞的光合作用活性^[15-16],可以用来解释藻细胞失活的内在机制。目前的研究主要是针对蓝藻,对硅藻的去除研究很少,鉴于常用化学药剂对蓝藻的去除效果好,本研究对比考察了NaClO、KMnO₄在不同投加量和不同pH条件下对硅藻的灭活效果,旨在为硅藻灭活技术研究提供一定的参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料和试剂

硅藻属针杆藻(*Synedra sp.*, FACHB-1296)购自中国科学院武汉水生生物研究所,采用AGP培养基^[17],在恒温光照培养箱中进行培养。恒温光照培养箱运行参数:温度为20.0±1.0℃;光照强度为2500 Lx;光/暗周期为14 h:10 h。实验中所使用的针杆藻初始浓度约为25~35×10⁶ cell/L。

试验中采用的NaClO溶液(ω%:36.5%)和高锰酸钾均为分析纯。

1.2 试验方法

试验采用同一培养阶段的针杆藻,在不同的pH及NaClO/KMnO₄投加量下,分别检测了其光合作用活性的变化,进而表征氯化与KMnO₄预氧化对针杆藻的灭活特性。大多数自然水体的pH在6.0~9.0之间,反应藻液的pH分别采用0.1 mol/L的盐酸和NaOH进行调节,研究在酸性、中性、碱性(pH分别为5、7、9)水体中NaClO和KMnO₄对硅藻光合活性的影响。硅藻在温度15~25℃时生长较佳^[18],并且易在春季“爆发”^[13],因此,调节试验的反应温度始终维持在20.0±1.0℃(DC-0510智能恒温槽,宁波新芝生物科技股份有限公司)。反应过程中,采用磁力搅拌器对藻液进行搅拌,确保其各部分均匀。在预先设定的时间点进行取样,并在样品中加入一定量0.1 mol/L Na₂SO₃溶液,用于终止氧化反应,随即对样品进行分析。

1.3 分析方法

针杆藻的PSII系统的光量子产量Y(反映实际光合效率),叶绿素a及快速光响应曲线(rapid light curves, RLC)采用浮游植物分类荧光仪(PHYTO-PAM,德国Walz公司)进行测定。快速光响应曲线的测量条件设定为:步长10 s,最大光照强度764 μmol·m⁻²·s⁻¹。参数α、ETR_{max}由如下RLC方程拟合得到^[19],见式(1)。

$$ETR = ETR_{\max} \times$$

$$(1 - \alpha \times PAR / ETR_{\max}) \times e^{-\beta \times PAR / ETR_{\max}} \quad (1)$$

式中: ETR 为相对电子传递速率; ETR_{\max} 为最大相对电子传递速率, 反映最大光合速率; PAR 为光强, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α 为初始斜率, 反映了光能的利用效率; 试验中主要通过 Y 、 α 、 ETR_{\max} 、叶绿素 a 值来反应藻细胞的活性。pH 采用雷磁 PHS-3C 型 pH 计测定。

NaClO 的浓度采用哈希公司的余氯仪量进行检定。

2 结果和讨论

2.1 NaClO 对针杆藻的灭活特性研究

2.1.1 NaClO 投加量对针杆藻灭活效果的影响

当 NaClO 投量分别为 0.5、1.0、2.0、3.0、5.0 mg/L 时, 针杆藻光合作用活性随时间的变化如图 1 所示。从图中可明显看出, 随着 NaClO 投量 (≤ 3 mg/L) 的增加, 各光合作用参数值的降解速率均随之加快, 而投量为 5 mg/L 对针杆藻光合作用活性的降解速率与 3 mg/L 的已无明显差异。

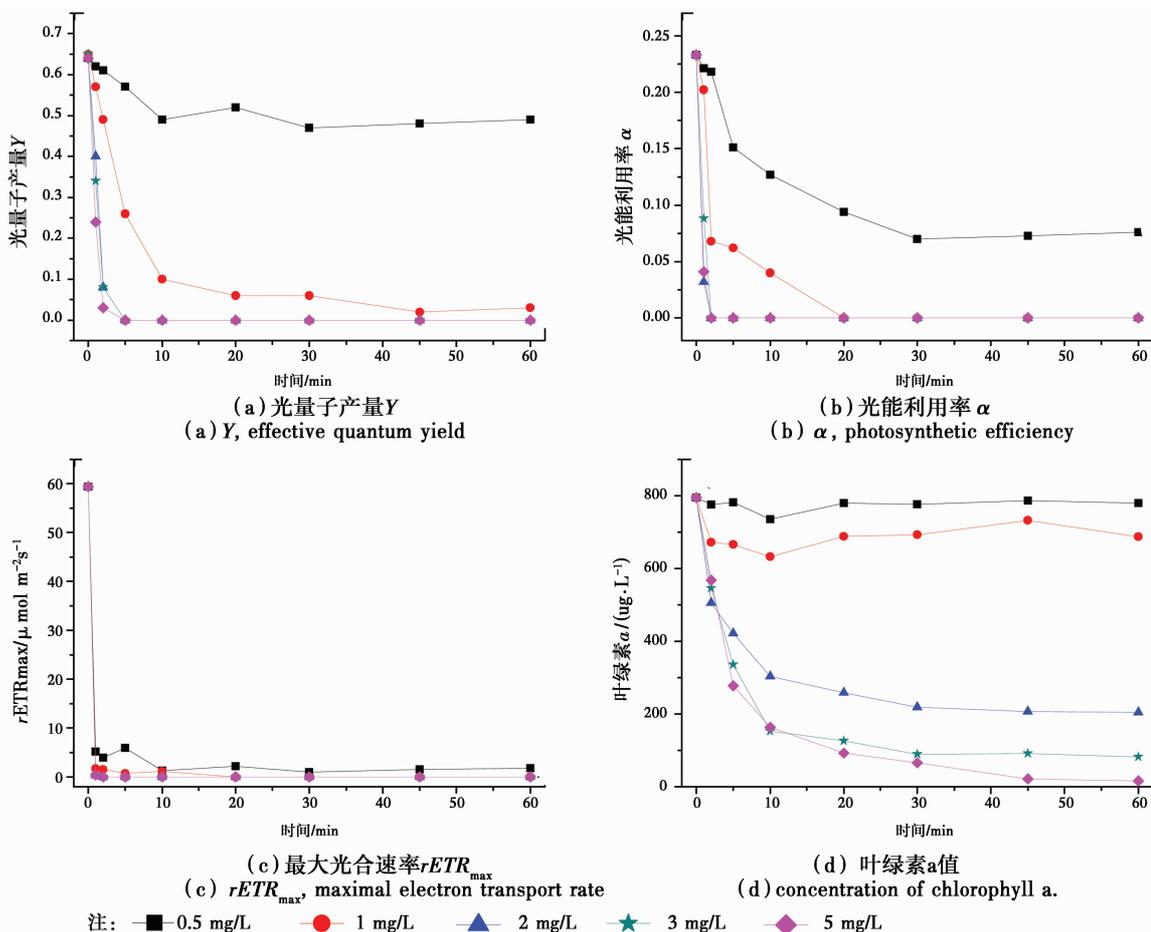


图 1 NaClO 投加量对针杆藻灭活效果的影响 ($\text{pH}=7.00 \pm 0.05$)

Fig. 1 Effects of NaClO dosages on photosynthetic activity of *Synechococcus* sp.

如图 1(a)~(c) 所示, 当 NaClO 投量为 2.0 mg/L 时, 反应 2 min 后针杆藻光能的利用效率 α 和最大相对电子传递速率 $rETR_{\max}$ 两个参数值均迅速降为 0, 且其降解主要发生在最初的 1 min 内; 反应 5 min 后光量子产量 Y 值也下降至 0, 且其下降主要在最初的 2 min 内。这说明 2.0 mg/L 的 NaClO 能在短时间内迅速抑制针杆藻的光合系统, 抑制可能从破坏 PSII 系统电子传递链开始。

如图 1(d) 所示, 在 NaClO 的投加量小于 1 mg/L 条件下, 60 min 反应时间内叶绿素 a 无明显降解; 当投量 ≥ 2.0 mg/L 时, 随着投加量的增加, 叶绿素 a 的降解速率逐渐增加, 并且在 0~10 min 时间内, 叶绿素 a 值降解最为显著, 30 min 以后趋于平缓; 并且图中可见当 NaClO 的投量为 3.0 和 5.0 mg/L 时, 叶绿素 a 的降解效果已无明显差异, 增大投加量不能明显提高其降解率。而郭建伟^[20] 的研

究发现,当 NaClO 的投加量在 3.75 mg/L 时,铜绿微囊藻的叶绿素 a 在最初的 1 min 内降解效果最为显著。在本次试验中,当 NaClO 的投加量为 3 mg/L 时 30 min 后叶绿素 a 的降解率为 86.6%,而在相同投加量下的 NaClO 对铜绿微囊藻的叶绿素 a 降解率在 30 min 时仅为 21.79% [21],故 NaClO 对针杆藻的叶绿素 a 降解率虽然反应初期较为缓慢,但后期的降解效果明显好于铜绿微囊藻。欧桦瑟等 [6] 提出了氯化灭活铜绿微囊藻过程的三个步骤的假说,即:氧化剂渗透-内部降解-细胞结构解体。由于硅藻的细胞壁由外层二氧化硅和内层果胶质组成,而蓝藻的细胞壁则由外层纤维素和内层果胶质组成,因此,细胞壁组成及结构的差异导致 NaClO 能更快速地破坏并渗透进入铜绿微囊藻细胞,而与其胞内物质发生化学反应。另一方面,由于铜绿微囊藻属原核生物,无核膜和叶绿体,其类囊体(膜上含有光合色素和电子传递链组分,为光合反应中心)分散在细胞质中;而针杆藻为真核生物,有核膜和叶绿体,其类囊体集中位于一个巨大轴生的叶绿体内。因此,类囊体的相对集中,使得相同的反应条件下 NaClO 对针杆藻中叶绿素 a 的破坏程度更大。

由图 1(a)和(b)比较看来,NaClO 对 Y 、 a 和 $rETR_{max}$ 值的降解主要发生在 2 min 内,而对叶绿素 a 的降解主要发生在 10 min 内,叶绿素 a 的降解要明显滞后。这可能是因为 NaClO 需要依次渗透进入硅藻细胞、叶绿体、类囊体才能与叶绿素 a 发生反应或是 NaClO 直接与细胞解体后释放的叶绿素 a 发生反应。因此,对叶绿体的破坏要先于叶绿素 a,而对叶绿体的破坏即可直接抑制针杆藻的光合系统。

但是,Ma 等 [7] 试验表明,氯化损坏铜绿微囊藻的细胞膜,并导致细胞内物质,如:毒素、K⁺, 叶绿素 a 的释放。因此,NaClO 灭活硅藻可能会造成细胞的解体,引起胞内有机物的释放,危及饮用水安全。

2.1.2 NaClO 对针杆藻的降解动力学 由 2.1.1 节中可知,藻的光合活性 Y 值和叶绿素 a 值随时间递减,并且其降解趋势呈现拟一级反应动力学的特征。

图 2 和表 1 显示,NaClO 投加量对针杆藻的降解影响是比较大的。当 NaClO 投加量为 0.5 mg/L 时, Y 值和叶绿素 a 值的降解速率常数 k 分别为

0.026 和 0.007 min⁻¹,而投加量增加到 3.0 mg/L 时, k 分别为 0.967 和 0.167 min⁻¹,影响非常大。

表 1 不同 NaClO 投加量降解针杆藻的光合活性参数拟合结果

Table 1 Fitting parameters of kinetics models on degradation of *Synedra* sp. Under various chlorine dosages

表(a)

Table (a)

$Y/(mg \cdot L^{-1})$	$-k$ 值	相关系数 R^2
0.5	0.026	0.995 8
1.0	0.185	0.996 9
2.0	0.926	0.914 3
3.0	0.967	0.960 2
5.0	1.420	0.964 9

表(b)

Table (b)

叶绿素 a 值/(mg · L ⁻¹)	$-k$ 值	相关系数 R^2
0.5	0.007	0.903 4
1.0	0.027	0.904 8
2.0	0.106	0.932 9
3.0	0.167	0.998 9
5.0	0.168	0.980 4

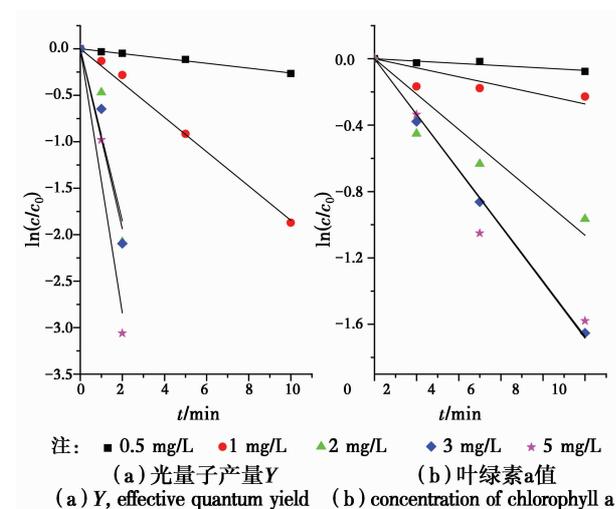


图 2 不同加氯量对反应速率常数 k 的影响

Fig. 2 Effects of various chlorine dosages on reaction rate constant k

不同 Y 值和叶绿素 a 值时, $\ln(c_1/c_0)$ 与反应时间 t 之间呈线性关系,如图 2 所示。其相关系数 $\geq 0.903 4$,可以认为 NaClO 降解针杆藻的反应是拟一级动力学反应,用下面的公式来表达反应类型:

$$\ln c_t = \ln c_0 - kt \quad (2)$$

式中： c_t 为各参数的初始值； c_0 为各参数值； t 为反应时间。

由图 3 可更明显的看出，针杆藻的降解速率随 NaClO 投加量的增加而增加，但是 k 值的增加幅度

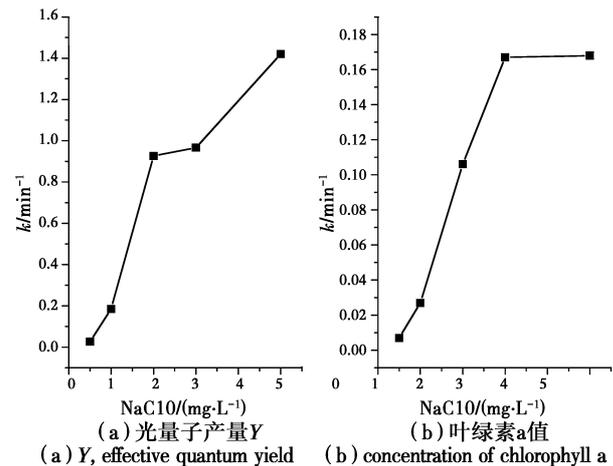


图 3 不同加氯量对反应速率常数 k 的影响
Fig. 3 Effects of various chlorine dosages on reaction rate constant k

在逐渐减小，特别是当投加量为 5.0 mg/L 时，其对叶绿素 a 的降解速率几乎与 3.0 mg/L 投加量的相同，说明降解的程度已经趋于饱和，因此从经济性的角度考虑认为，NaClO 降解针杆藻的最佳投加量为 3.0 mg/L。

2.1.3 NaClO 在不同 pH 条件下对针杆藻灭活效果的影响 NaClO 在不同 pH 条件下 (pH=5、7、9) 对针杆藻灭活效果的影响如图 4 所示。针杆藻在不同 pH 条件下的灭活速率依次为：pH=5 > pH=7 >> pH=9。这主要是因为 20℃ 时，当 pH=9.5 时，在水溶液中 NaClO 以 ClO⁻ 的形式存在；当 pH=7.5 时，以 ClO⁻ 及 HClO 各占 50% 的形式存在，而当 pH=5.0 时，以 HClO 的形式存在。一方面，由于硅藻表面带负电荷^[23]，因此，分子态的 HClO 更接近硅藻表面并渗透进入细胞。另一方面，HClO 的氧化还原电位远高于离子态的 ClO⁻。因此，NaClO 在酸性条件下更能发挥对硅藻的灭活作用。

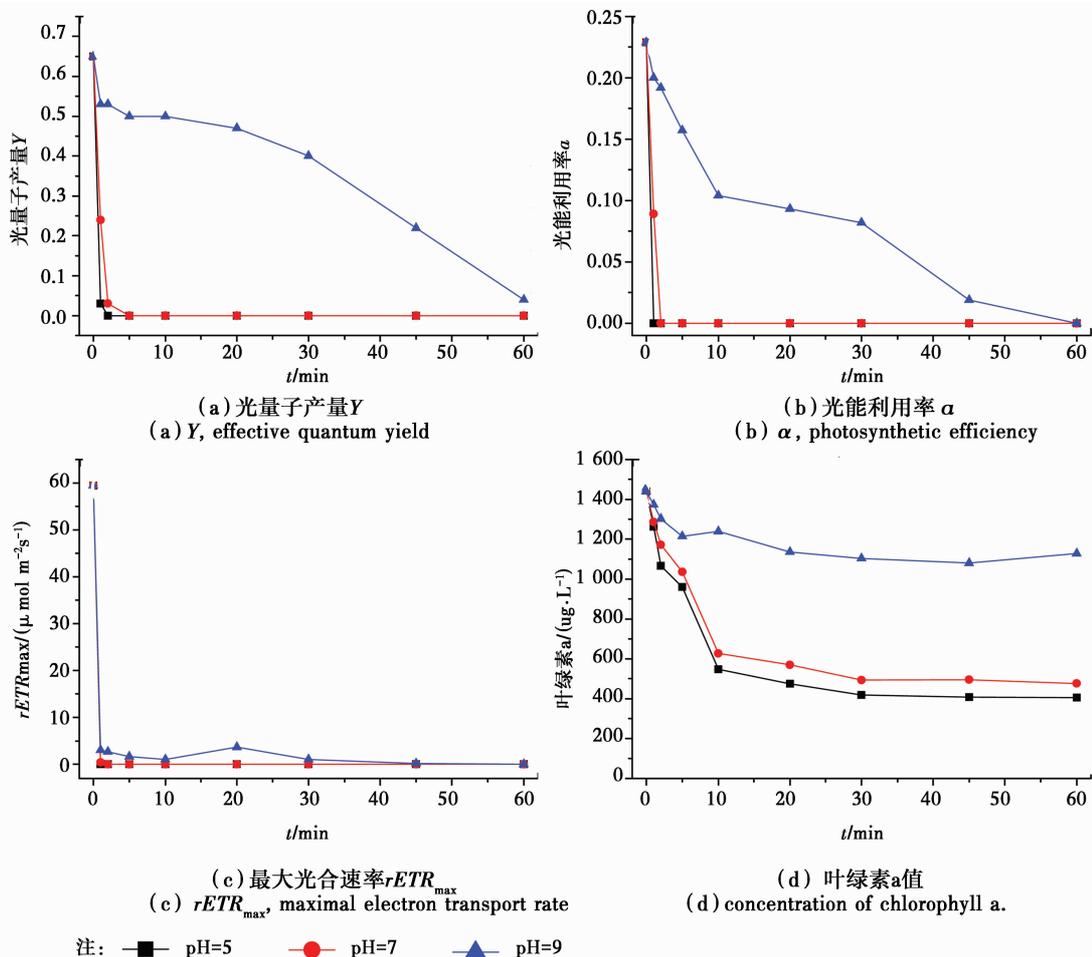


图 4 不同 pH 下 NaClO 对针杆藻灭活效果的影响
Fig. 4 Effects of different pH on growth curvature of *Synedra sp.*

2.2 KMnO₄ 对针杆藻的灭活研究

2.2.1 KMnO₄ 投加量对针杆藻灭活效果的影响

当KMnO₄投量分别为0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、5.0 mg/L时,针杆藻光合作用活性随时间的变化如图5所示。从图5(a)~(c)中可明显看出,KMnO₄对光合作用参数光量子产量Y值和光能利用率 α 值均无明显降解效果;而最大光合速率 $rETR_{max}$ 值的变化趋势与NaClO降解过程中该值的变化一致,在最初2 min内电子传递速率迅速降低,说明KMnO₄只抑制了电子的传递,减缓了针杆藻的光合系统PSII阶段,但是并没有从根本上对针杆藻的光合作用能力

进行破坏。

如图5(d)所示,在KMnO₄几种投量条件下,60 min反应时间内叶绿素a均无明显降解,而KMnO₄氧化是优先损坏藻细胞内的色素^[14],故可能是KMnO₄较难渗透进入针杆藻的叶绿体,因此不易实现对叶绿素a的降解,对光合系统抑制不明显。并且当KMnO₄的投加量 ≥ 1.5 mg/L时,水质呈红色,经过1.5 h没有褪色,可见较大的投加量会影响出水水质。因此,从整体上看,在pH=7时投加KMnO₄对针杆藻的活性影响不大。

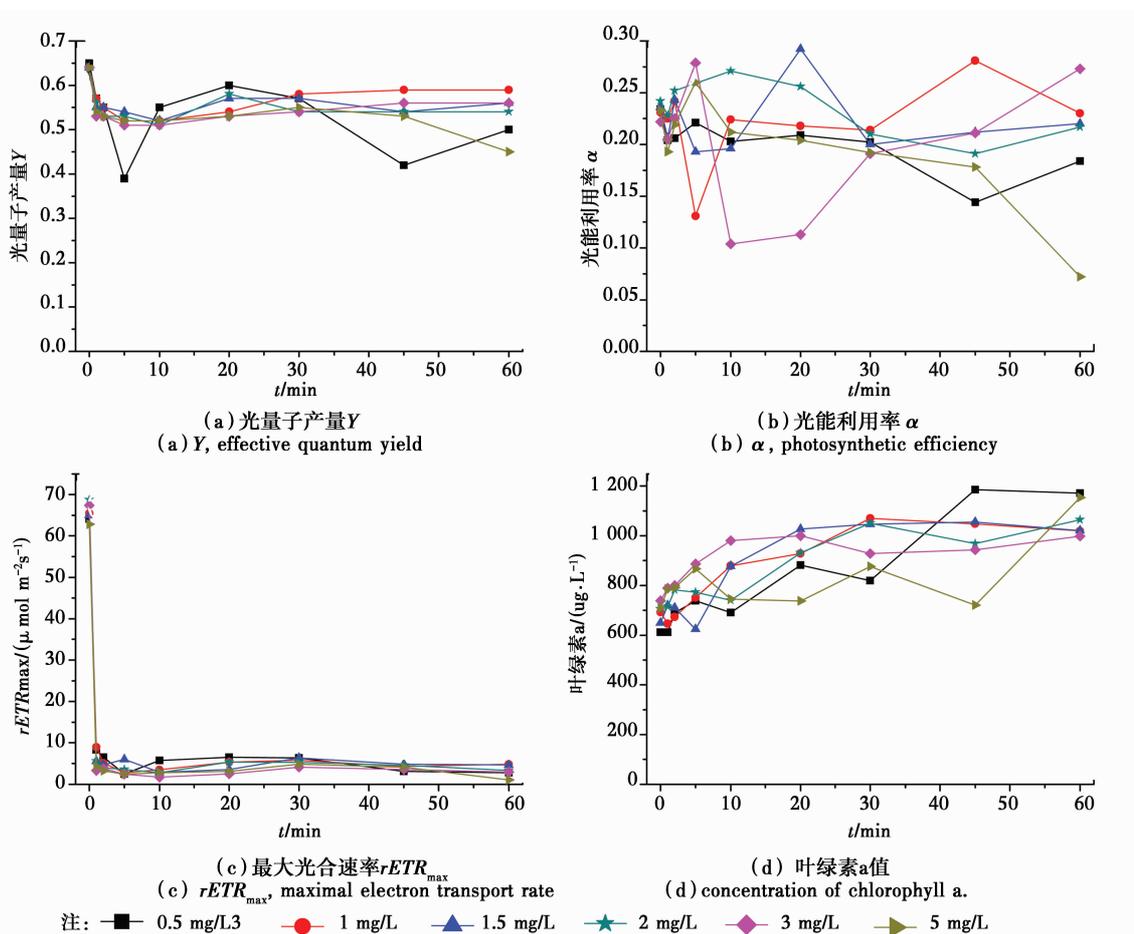


图5 KMnO₄投加量对针杆藻灭活效果的影响(pH=7.00±0.05)

Fig. 5 Effects of KMnO₄ dosages on growth curvature of *Synechococcus* sp.

而Fan等^[24]研究指出,高锰酸钾能有效降解微囊藻,并且在1~3 mg/L范围内能保持藻细胞结构完整^[25],明显优于对硅藻的灭活效果,可能是因为蓝藻和硅藻的细胞壁组成与结构的差异。在本研究中明显观察到氯化对针杆藻的灭活效果要优于高锰酸钾对其的氧化作用,Fan等^[26]对蓝藻的处理研究也报道了类似的意见。

2.2.2 KMnO₄在不同pH条件下对针杆藻灭活效果的影响 KMnO₄在不同pH条件下(pH=5、7、9)对针杆藻灭活效果的影响如图6所示。针杆藻在不同pH条件下的灭活速率依次为:pH=5>pH=7>pH=9。这主要是因为KMnO₄在酸性和碱性条件下其反应式不同,在酸性条件下其标准氧化还原电位为 $E_0=1.51$ V,Mn能由+7价降低到+2

价,而在中性和碱性条件下,其氧化还原电位低得多,分别只有 $E_0 = 0.588 \text{ V}$ 和 $E_0 = 0.564 \text{ V}^{[27]}$, Mn

各自只能降低到 +4 和 +6 价,说明其氧化性的顺序为酸性 \gg 中性 $>$ 碱性。

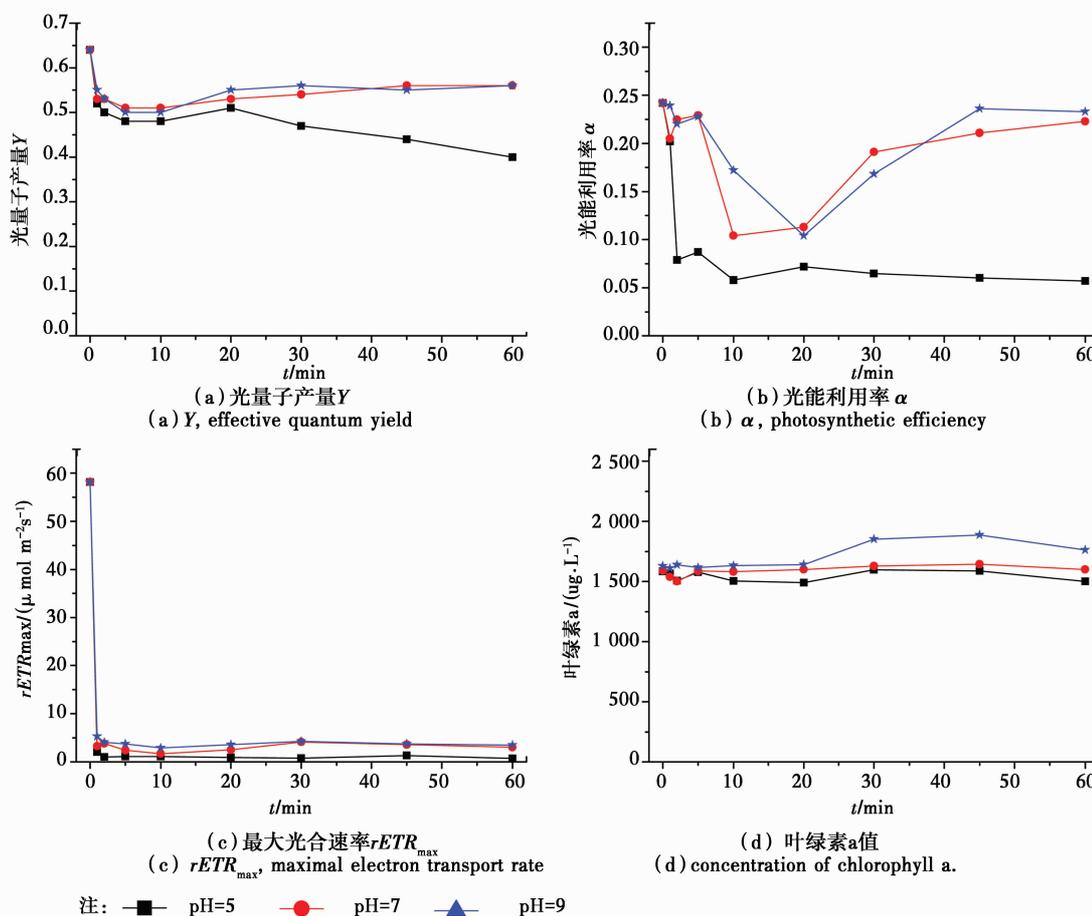


图 6 不同 pH 下 KMnO_4 对藻降解参数随反应时间的影响

Fig. 6 Effects of different pH on growth curvature of *Synedra* sp.

如图 6(a-c)所示,即使是 $\text{pH}=5$ 时,在 60 min 后,其 Y 值也只降低到了 0.4,降解率仅为 37.5%。并且如图 6(d)中所示,3 种 pH 条件下叶绿素 a 在 60 min 内都没有明显的降解趋势。因此,从整体上看, KMnO_4 对针杆藻没有明显的灭活效果。

3 结论

1) NaClO 对针杆藻的灭活效果显著,其降解过程符合拟一级反应动力学,投加量为 3 mg/L 时就能达到很好的灭活效果。但是氯化会破坏细胞结构,使细胞分解,引起藻内有机物的释放,在后续试验研究中,可以探讨胞内有机物释放对饮用水安全的影响。

2) 酸性条件下 NaClO 能更好的发挥其氧化降解的作用。

3) KMnO_4 在投加量 $\leq 5 \text{ mg/L}$ 时对针杆藻的灭

活效果不明显;更高剂量下可能会对针杆藻的灭活效果更明显,但是会影响出水水质。

4) 酸性和碱性条件下 KMnO_4 对针杆藻都没有明显的灭活效果。

参考文献:

- [1] 邱光胜,胡圣,叶丹,等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 311-316.
- Qiu G S, Hu S, Ye D, et al. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of three gorges reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3): 311-316. (in Chinese)
- [2] 吴光应,刘晓霁,万丹,等. 三峡库区大宁河 2010 年春季水华特征 [J]. 中国环境监测, 2012, 28(3): 47-52.
- Wu G Y, Liu X A, Wan D, et al. The characteristics of

- spring algae blooms in the DaNing River, three gorge reservoir, 2010 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(3):47-52. (in Chinese)
- [3] 杨敏,毕永红,胡建林,等. 三峡水库香溪河库湾春季水华期间浮游植物昼夜垂直分布与迁移 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23(3):375-382.
- Yang M, Bi Y H, Hu J L, et al. Diel vertical migration and distribution of phytoplankton during spring blooms in Xiangxi Bay, three gorges reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3):375-382. (in Chinese)
- [4] Ahn C Y, Joung S H, Choi A, et al. Selective control of cyanobacteria in eutrophic pond by a combined device of ultrasonication and water pumps [J]. *Environmental Technology*, 2007, 28: 371-379.
- [5] Wu X G, Joyce E M, Mason T J. Evaluation of the mechanisms of the effect of ultrasound on microcystis aeruginosa at different ultrasonic frequencies [J]. *Water Research*, 2012, 46 (9): 2851-2858.
- [6] Ou H, Gao N Y, Deng Y, et al. Mechanistic studies of microcystic aeruginosa inactivation and degradation by UV-C irradiation and chlorination with polysynchronous analyses [J]. *Desalination*, 2011, 272 (1/2/3): 107-119.
- [7] Ma M, Liu R P. Chlorination of microcystis aeruginosa suspension: Cell lysis, toxin release and degradation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 217/218: 279-285.
- [8] Daly R I, Ho L, Brookes J D, Effect of chlorination on Microcystis aeruginosa cell integrity and subsequent microcystin release and degradation [J]. *Environmental Science Technology*. 2007, 41: 4447-4453.
- [9] Lin T F, Chang D W, Lien S K, et al. Effect of chlorination on the cell integrity of two noxious cyanobacteria and their releases of odorants [J]. *Journal of Water Supply Research and Technology*. 2009, 58: 539-551.
- [10] Zamyadi A, Ho L, Newcombe G, et al. Prévost, Release and oxidation of cell-bound saxitoxins during chlorination of *Anabaena circinalis* cells [J]. *Environment Science Technology* 2010, 44: 9055-9061.
- [11] Chen J J, Yeh H H. The mechanisms of potassium permanganate on algae removal [J]. *Water Research*, 2005, 39: 4420-4428
- [12] Tung S C, Lin T F, Liu C L, et al. The effect of oxidants on 2-MIB concentration with the presence of cyanobacteria [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 49: 281-288
- [13] 许国仁, 李圭白. 高锰酸钾复合药剂强化过滤微污染水质的效能研究 [J]. *环境科学学报*, 2002, 22(5): 664-670.
- Xu G R, Li G B. Efficiency of enhanced filtration with composite potassium permanganate (CP) in polluted drinking water treatment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(5): 664-670. (in Chinese)
- [14] Ou H, Gao N Y, Wei C H, et al. Immediate and long-term impacts of potassium permanganate on photosynthetic activity, survival and microcystin-LR release risk of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 219-220(15): 267-275.
- [15] Bailey S, Grossman A. Photoprotection in cyanobacteria: regulation of light harvesting *Photochem. Photobiol.*, 2008, 84: 1410-1420
- [16] Campbell D, Hurry V, Clarke A K, et al. Chlorophyll fluorescence analysis of cyanobacterial photosynthesis and acclimation [J]. *Microbiology Molecular Biology Reviews*, 1998, 62: 667-683
- [17] 张凤岭, 王翠婷. 生物技术 [M]. 东北师范大学出版社, 1993:277-278.
- Zhang F L, Wang C T. *Biotechnology* [M]. *Journal of Northeast Normal University Press*, 1993:277-278. (in Chinese)
- [18] 湖北省水生生物研究所藻类研究室藻类应用组. 淡水硅藻的大量培养 [J]. *水生生物学集刊*, 1975, 5(4): 503-511.
- Section of Applied Phycology, Laboratory of Phycology, Institute of Hydrobiology, Hupei Province. Mass culture of freshwater diatoms [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1975, 5(4): 503-511. (in Chinese)
- [19] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. *Aquatic Botany*, 2005, 82:222-237.
- [20] 郭建伟. 紫外线对水中铜绿微囊藻和藻毒素控制研究 [D]. 上海: 同济大学, 2010.
- Guo J W. Investigation on the removal of microcystis aeruginosa and microcystins from water by UV irradiation [D]. *Shanghai: Tongji University*, 2010. (in Chinese)
- [21] 欧桦瑟. 氯化物和UVC灭活铜绿微囊藻的机理 [J]. *华南理工大学报: 自然科学版*, 2011, 39(6):100-105.

- Ou H S. Inactivation mechanism of microcystic aeruginosa by chlorination and UVC irradiation [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 39 (6): 100-105. (in Chinese)
- [22] Robert E L. 藻类学 [M]. 科学出版社, 2012.
Robert E L. Algology [M]. Science Press, 2012. (in Chinese)
- [23] Bernhardt H, Clasen J. Flocculation of microorganisms [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua, 1991, 40: 76-87.
- [24] Fan J J, Robert D. Impact of potassium permanganate on cyanobacterial cell integrity and toxin release and degradation [J]. Chemosphere, 2013, 92: 529-534.
- [25] Chen J J, Yeh H H. The mechanisms of potassium permanganate on algae removal [J]. Water Research, 2005, 39: 4420-4428.
- [26] Daly R I, Ho L, Brookes J D. Effect of chlorination on Microcystis aeruginosa cell integrity and subsequent microcystin release and degradation [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41: 4447-4453.
- [27] 李圭白, 杨艳玲, 马军, 等. 高锰酸钾去除天然水中微量有机污染物机理探讨 [J]. 大连铁道学院学报, 1998, 19 (2): 1-4.
Li G B, Yang Y L, Ma J, et al. Research on mechanism of removal of microorganic pollutants in natural water by permanganate [J]. Journal of Dalian Railway Institute, 1998, 19(2): 1-4. (in Chinese)

(编辑 胡玲)