

再生水水质环境中典型水华藻的生长特性

杨佳, 胡洪营*, 李鑫

(清华大学环境科学与工程系 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 北京 100084)

摘要: 基于微藻的生长潜力试验, 研究了再生水回用于景观水体时的水华风险. 结果表明, 在天然混合藻种接种体系中, 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 在再生水水质条件下的生长潜力大于其他受试藻种, 其在 3 种二级出水 (A²O、氧化沟和活性污泥) 中的最大藻密度均可大于 10⁶ 个·mL⁻¹, 比生长速率 > 0.39 d⁻¹. A²O-超滤膜过滤-活性炭吸附-氯消毒深度处理工艺没有有效减低铜绿微囊藻的生长潜力, 难以减小水华风险. 再生水中的 TP 浓度能够明显影响铜绿微囊藻的最大密度 (K_{max}) 和最大种群增长速率 (R_{max}), 且符合 Monod 方程.

关键词: 铜绿微囊藻; 再生水; 磷初始质量浓度; 藻类生长潜力; 水华控制

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)01-0076-06

Growth Properties of Typical Water Bloom Algae in Reclaimed Water

YANG Jia, HU Hong-ying, LI Xin

(ESPC State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on Algal Growth Potential Test, the water bloom risk of reclaimed water was studied. *Microcystis aeruginosa* was proved as the main algae under the experimental conditions in this study. In 3 kinds of secondary effluent (A²O, Oxidation Ditch and Activated Sludge), its maximum density could attain above 10⁶ cells·mL⁻¹, and the specific rate was above 0.39 d⁻¹. Advanced treatment (A²O-Ultrafiltration Membrane Filter-Activated Carbon and Chlorine Disinfection) did not reduce the growth potential of *Microcystis aeruginosa*. The effects of initial concentration of phosphorus in reclaimed water on maximum density (K_{max}) and population growth rate (R_{max}) of *Microcystis aeruginosa* can be described with Monod equation.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; reclaimed water; initial TP concentration; algae growth potential; water bloom control

我国水资源严重短缺, 污水再生利用是解决水资源短缺问题的有效途径^[1,2]. 再生水回用于景观环境是满足缺水城市对娱乐性水环境需要而发展起来的一种再生水回用方式, 也是完成水生态循环的自然修复与恢复的最佳途径^[3]. 在国外, 再生水回用于景观水体非常普遍^[4,5], 国内将经二级处理后的城市污水回用于景观环境正处于起步阶段^[6-8]. 水华问题是回用过程中面临的主要问题^[9-10]. 因而研究水华藻种在再生水水质条件下的生长特性有着重要意义.

本研究选择北京市污水厂出水为对象, 分析了

其回用于景观水体的水华风险, 确定了主要水华藻种, 并研究了 TP 浓度对其生长的影响.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 水样

实验水样采自北京市 Q 污水处理厂、J 污水处理厂、G 污水处理厂二级处理出水 (以下简称为 Q 水样、J 水样和 G 水样), 水质指标如表 1 所示. 水样经中速定性滤纸过滤后直接使用.

表 1 试验用水及水质

Table 1 Wastewater samples and related water quality

水样	工艺	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	pH
Q	A ² O	15.5 ± 1.1	0.05 ± 0.01	2.5 ± 0.01	7.7 ± 0.2
J	氧化沟	16.7 ± 1.2	0.08 ± 0.12	2.3 ± 0.51	7.6 ± 0.1
G	活性污泥	27.1 ± 2.4	2.9 ± 0.42	13 ± 2.5	7.8 ± 0.2

1.1.2 藻种

铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、羊角月牙藻

(*Selenastrum capricornutum*)、二形栅藻 (*Scenedesmus dimorphus*) 和椭圆小球藻 (*Chlorella ellipsoidea*) 由中国科学院水生生物研究所淡水藻种库提供. 铜绿微囊

收稿日期: 2009-02-10 修订日期: 2009-06-02

基金项目: 国家杰出青年基金项目(50825801)

作者简介: 杨佳(1983~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术. E-mail: yangjia1121@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: jhyh@tsinghua.edu.cn

藻培养基采用 BG11, 二形栅藻、蛋白核小球藻、羊角月牙藻培养基采用 SE 配方. 试验前藻种置于温度为 25℃, 光照强度 40~60 lx, 相对湿度 75%, 光暗比 14 h:10 h 的人工气候箱中培养使之处于对数增长期.

1.2 试验方法

1.2.1 藻类生长特性研究

藻类生长特性研究参照藻类增长潜力试验 (Algal Growth Potential Test)^[11] 进行. 向 250 mL 锥形瓶中加入 100 mL 试验水样, 高温高压灭菌 (121℃, 30 min) 后待用. 取 1.0 mL 藻液 (预先用 15 mg·L⁻¹ 的碳酸氢钠溶液洗涤 2 次) 接种至试验水样中, 置于温度 25℃, 光照强度 40~60 lx, 相对湿度 75%, 光暗比 14 h:10 h 的人工气候箱中培养. 每组试验做 3 个平行样. 采用血球计数板计数藻细胞数目, 再换算出培养液中的藻细胞密度. 藻细胞干重测定取一定体积藻液离心浓缩后通过中速定性滤纸过滤, 于 105℃ 下烘干至恒重称重.

1.2.2 水质指标测定

水质指标测定测定均采用国家环境保护总局颁布的标准方法, TN、TP 和 NH₄⁺-N 的测定方法分别为过硫酸钾氧化紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法和水杨酸-次氯酸盐光度法^[12]. pH 测定采用梅特勒 SG2 型 pH 计.

1.3 数据分析

利用 Logistic 模型分析藻的生长特性. Logistic 模型是描述有限环境下种群生物量增长速率具密度制约特点的经典种群增长模型^[13]:

$$N = \frac{K}{1 + e^{a-rt}} \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(\frac{K - N}{K} \right) \quad (2)$$

式中, N 为 t 时刻的种群密度 (个·mL⁻¹); t 为培养时间 (d); K 为种群最大密度 (个·mL⁻¹); a 为常数, 表示曲线对原点的相对位置; r 为种群的比生长速率或内禀增长速率 (d⁻¹), 指单个个体潜在的最大增长速率; dN/dt 为种群生物量的增长速率 [个·(mL·d)⁻¹].

式 (1) 表示种群生物量随时间变化的生长曲线, 具“S”型特征. 式 (2) 表示生物量增长速率随密度变化的规律, 当密度为最大密度一半时, 生物量的增长速率最大, 为 $R_{\max} = rK/4$ [个·(mL·d)⁻¹].

2 结果与讨论

2.1 再生水回用于景观水体时的优势水华藻种

分别向 200 mL 的 Q、J、G 水样中接种 5 mL 湖水, 在 4~10℃、23~28℃ 和 30~38℃ 的条件下进行培养. 培养 15 d 后测定藻细胞干重, 结果如图 1 所示. 23~28℃ 时, 水样 Q、J、G 中混合藻的干重均达到最大值, 说明再生水在 23~28℃ 时暴发水华的可能性最大.

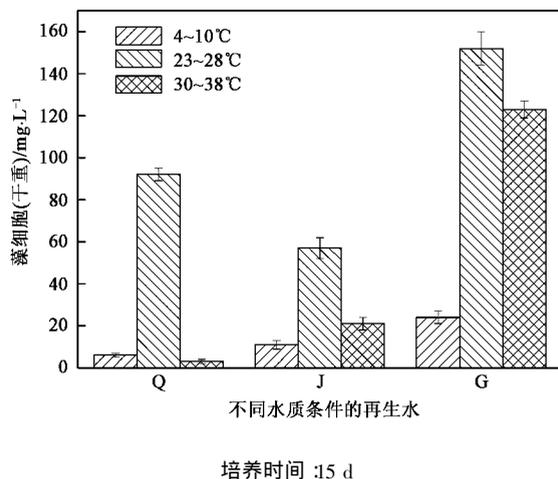


图 1 不同温度条件下混合藻在水样 Q、J、G 中的生长潜力
Fig. 1 Growth potential of mixed algae in samples Q, J and G under different temperature

对上述培养结果进行镜检, 结果如表 2 所示. 镜检结果表明, 优势藻种主要包括铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)、椭圆小球藻 (*Chlorella ellipsoidea*)、二形栅藻 (*Scenedesmus dimorphus*) 和羊角月牙藻 (*Selenastrum capricornutum*).

为进一步确定优势藻种, 分别取上述 4 株购买自藻种库的纯藻种接种于水样 Q, 结果如图 2 所示. 铜绿微囊藻的生长速率最快, 椭圆小球藻次之, 二形

表 2 混合藻在水样 Q、J、G 中的优势藻种

Table 2 Main species of algae in samples Q, J and G

温度/℃	Q 水样	J 水样	G 水样
4~10	谷皮菱形藻	水华束丝藻	铜绿微囊藻
23~28	羊角月牙藻; 二形栅藻	铜绿微囊藻; 水华束丝藻	椭圆小球藻; 铜绿微囊藻
30~38	未检出	二形栅藻	椭圆小球藻; 铜绿微囊藻

栅藻随后,羊角月牙藻最慢.可认为铜绿微囊藻在再生水中的生长潜力大于其他3种藻种.

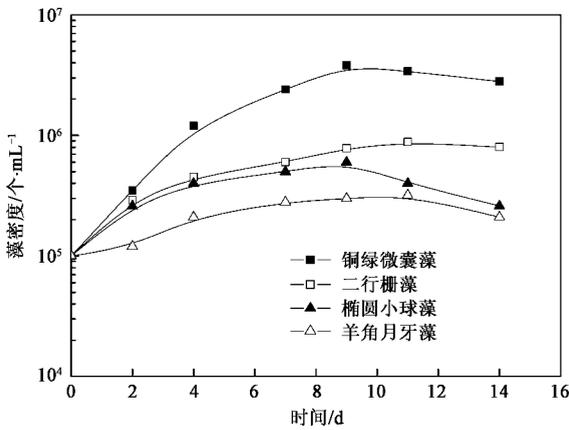


图2 混合藻种在水样Q中的生长曲线

Fig.2 Growth curve of mixed algae in sample Q

铜绿微囊藻是一种常见的水华藻,但在再生水质条件下是否会成为优势藻种却少见报道.由于研究对象和实验条件的不同,不同研究者对再生水中的优势藻种的结论也有所差异.丁国际等^[14]利用再生水对公园湖水天然混合藻类进行生长影响试验研究,认为再生水对微囊藻属生长具有促进作用.刘靖^[15]对北京市长河水系调研表明,蓝藻门的铜绿微囊藻是优势藻群.周律等^[16]利用城市生活污水二级出水作为景观水源,认为其中绿藻门的小球藻是优势水华藻.

2.2 二级处理再生水中铜绿微囊藻的生长潜力

表3 水样Q、J、G中的铜绿微囊藻生长的Logistic模型拟合参数

Table 3 Logistic parameters of *Microcystis aeruginosa*'s growth in samples Q J G

水样	相关系数 R	最大密度 K $\times 10^6/\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$	比生长速率(r) $/\text{d}^{-1}$	种群最大增长速率 R_{\max} $\times 10^6/(\text{个}\cdot\text{mL}\cdot\text{d})^{-1}$
Q	0.98	2.64 ± 0.59	0.39	0.26 ± 0.06
J	0.97	2.47 ± 0.88	0.40	0.25 ± 0.09
G	0.98	10.63 ± 2.38	0.55	1.45 ± 0.23

藻细胞的比生长速率是指藻细胞个体潜在的最大增长速率,高学庆等^[17]的研究结果表明,当培养基中TP浓度为0.018~1.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,铜绿微囊藻的比生长速率为0.253~0.345 d^{-1} ,与本研究结果相似,说明水样Q、J、G并不会对铜绿微囊藻的生长造成抑制作用.

藻密度能直接说明水华优势藻暴发的强度.藻密度高于 10^4 $\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时被认为具有轻度水华风险^[18,19],藻细胞密度到 10^6 $\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时则被认为发生了严重水华^[9,10].A²O、氧化沟和活性污泥法均为常

向水样中接种铜绿微囊藻,于25℃培养,结果如图3所示.整体而言,水样Q、J、G中,铜绿微囊藻在培养第14 d时藻密度为初始值的10~100倍.其中,水样G中铜绿微囊藻在培养第3 d进入稳定期,最大藻密度(第13 d)为 1.1×10^7 $\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$.水样Q、J中铜绿微囊藻在培养第5 d进入稳定期,最大藻密度(第12 d)分别为 2.6×10^6 $\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 2.5×10^6 $\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$.

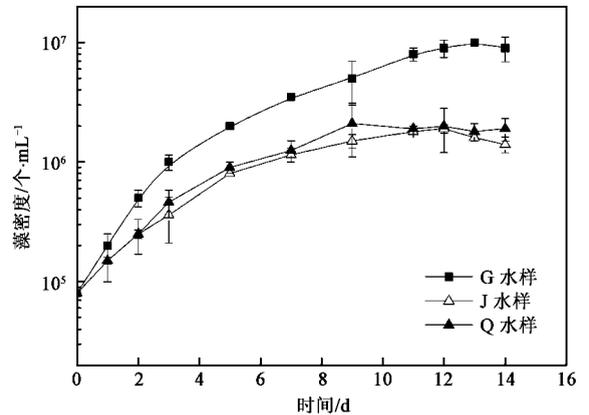


图3 铜绿微囊藻在水样Q、J、G中的生长曲线

Fig.3 Growth curve of *Microcystis aeruginosa* in samples Q, J and G

利用Logistic模型对水样Q、J、G中铜绿微囊藻的生长曲线进行拟合,结果如表3所示.其中,水样Q、J、G中铜绿微囊藻的比生长速率分别为0.39、0.40和0.55 d^{-1} ,最大藻密度分别为 2.6×10^6 、 2.5×10^6 和 1.1×10^7 $\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$.

见的传统二级生物处理工艺,铜绿微囊藻在以上3种传统二级生物处理工艺再生水中的藻密度均可达到 10^6 $\text{个}\cdot\text{mL}^{-1}$ 以上,可认为常见的传统二级处理后再生水在回用于景观水体时可能会引起水华暴发.

2.3 三级深度处理后再生水中铜绿微囊藻的生长潜力

三级深度处理工艺是保障再生水回用安全的重要手段,而膜过滤、活性炭吸附和加氯消毒是常用的再生水深度处理工艺.针对北京市某污水处理厂,研究了以上3种深度处理工艺处理后再生水中铜绿微

囊藻的生长潜力.其中,该污水处理厂采用的处理工艺为 A^2O + 超滤膜过滤 + 活性炭吸附 + 氯消毒.

表 4 为 A^2O -超滤膜过滤-活性炭吸附-氯消毒深度处理工艺各单元出水的水质指标,分别向各处理

阶段出水中接种铜绿微囊藻,结果如图 4 所示.可以看出,二级出水经过超滤膜过滤、活性炭吸附和加氯消毒 3 个深度处理环节后铜绿微囊藻的生长未受影响,培养 10 d 后最大藻密度仍可接近 10^6 个 $\cdot mL^{-1}$.

表 4 深度处理工艺各单元出水的水质

Table 4 Effluent qualities of different units of advanced treatment processes

处理工艺	TN/ $mg \cdot L^{-1}$	TP/ $mg \cdot L^{-1}$	$NH_4^+ - N$ / $mg \cdot L^{-1}$	pH
A^2O (二级出水)	15.5 ± 1.1	0.05 ± 0.01	2.5 ± 0.01	7.7 ± 0.2
膜过滤	16.4 ± 0.2	0.05 ± 0.01	2.4 ± 0.05	7.4 ± 0.5
活性炭吸附	13.2 ± 1.4	0.03 ± 0.02	2.2 ± 0.02	7.8 ± 0.1
加氯消毒	12.6 ± 1.8	0.04 ± 0.01	2.2 ± 0.08	7.6 ± 0.4

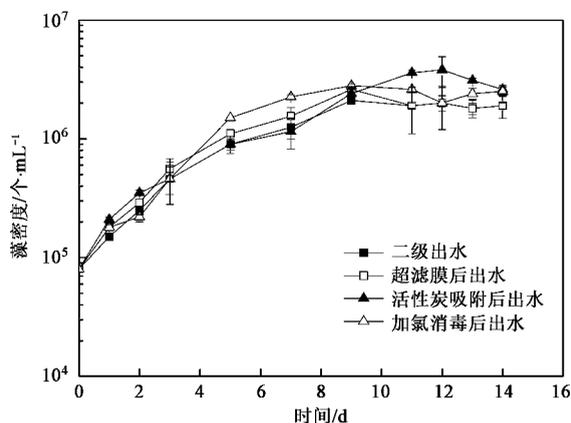


图 4 铜绿微囊藻在不同深度处理过程后的再生水中的生长潜力

Fig. 4 Growth potential of *Microcystis aeruginosa* in effluents of different advanced treatment processes

2.4 TP 浓度对铜绿微囊藻在再生水中生长特性的影响

N、P 等营养元素是影响水华发生的首要因子.通常认为,当氮磷比 > 7.2 时,磷是藻类增长的限制因素^[20-23].本研究中,水样 G、Q、J 中氮磷比分别为 9.3、310 和 209,因而认为磷元素是铜绿微囊藻的限制因素.

取 TP 浓度很低的水样 Q,通过添加正磷酸盐获得不同起始 TP 浓度的再生水;为保证 N 元素的充足,另添加硝酸盐使 TN 的起始浓度固定在 $15.0 mg \cdot L^{-1}$.图 5 表示了不同初始 TP 浓度下铜绿微囊藻的生长曲线.整体而言,初始 TP 浓度越高,铜绿微囊藻生长越快,最大藻密度越高.其中,当初始 TP 浓度分别为 0.1 、 0.2 和 $0.5 mg \cdot L^{-1}$ 时,铜绿微囊藻在培养第 4 d 进入稳定期,最大藻密度分别为 3.5×10^6 、 4.4×10^6 和 8.1×10^6 个 $\cdot mL^{-1}$;当初始 TP 浓度分别为 1.0 和 $2.0 mg \cdot L^{-1}$ 时,铜绿微囊藻在培养第 2 d 进

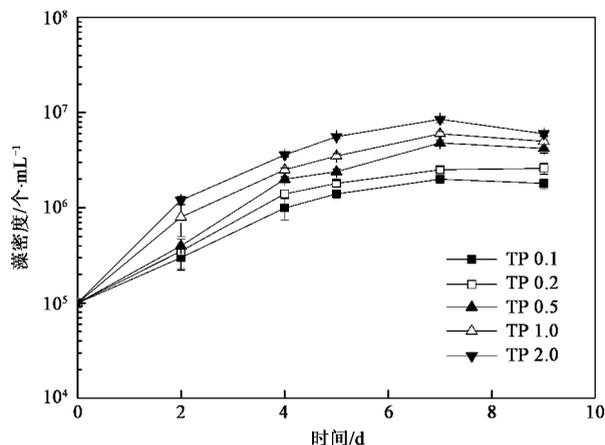


图 5 不同 TP 质量浓度下铜绿微囊藻的生长曲线

Fig. 5 Growth curves of *Microcystis aeruginosa* under different initial TP concentrations

入稳定期,最大藻密度分别为 9.2×10^6 个 $\cdot mL^{-1}$ 和 1.0×10^7 个 $\cdot mL^{-1}$.

利用 Logistic 模型拟合不同初始 TP 浓度下铜绿微囊藻的生长曲线,结果如图 6、图 7 所示.

藻细胞在不同的 TP 初始浓度下的比生长速率

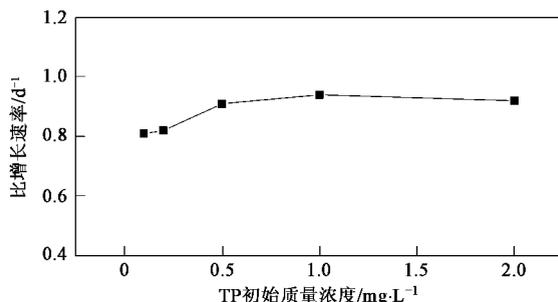


图 6 不同初始 TP 质量浓度下铜绿微囊藻的比生长速率

Fig. 6 Specific growth rate of *Microcystis aeruginosa* under different initial TP concentrations

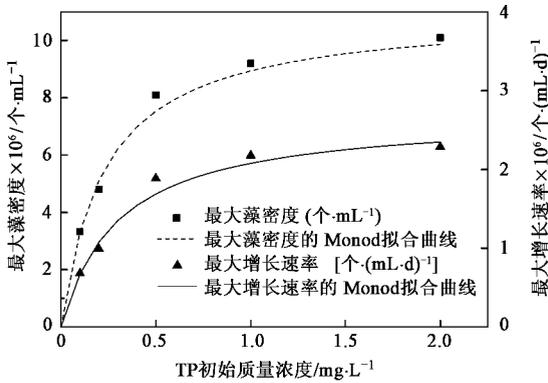


图7 不同初始 TP 质量浓度下铜绿微囊藻的最大藻密度和最大增长率

Fig.7 Maximum algal density and maximum growth rate of *Microcystis aeruginosa* under different initial TP concentrations

差别不大,均在 $0.81 \sim 0.94 \text{ d}^{-1}$ 之间。这说明单个藻细胞生长速率在不同的 TP 初始浓度下变化不大,藻细胞的最大密度和种群最大增长率 ($R_{\max} = rK/4$) 也呈增加趋势,且增长趋势符合 Monod 方程。

式(3)是铜绿微囊藻生物量最大增长速率与 TP 质量浓度关系的 Monod 模型:

$$R_{\max, P} = \frac{R'_{\max, P} \rho_P}{K_P + \rho_P} \quad (3)$$

式中, $R'_{\max, P}$ 为饱和增长速率,即饱和 TP 质量浓度时的生物量最大增长率 $[\text{个} \cdot (\text{mL} \cdot \text{d})^{-1}]$; ρ_P 为 TP 质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); K_P 为 TP 质量浓度的半饱和速率常数。

式(4)是铜绿微囊藻最大密度与 TP 质量浓度关系的 Monod 模型:

$$K'_{\max, P} = \frac{K'_{\max, P} \rho_P}{K'_P + \rho_P} \quad (4)$$

式中, $K'_{\max, P}$ 为饱和最大密度,即饱和 TP 质量浓度时的铜绿微囊藻的最大密度 ($\text{个} \cdot \text{mL}^{-1}$); K'_P 为 TP 质量浓度的半饱和速率常数。

利用 Monod 方程拟合铜绿微囊藻的最大增长速率和最大藻密度与 TP 初始质量浓度的关系,参数如表 5 所示,即:

$$R_{\max, P} = \frac{2.7 \times 10^6 \rho_P}{0.30 + \rho_P}$$

$$K'_{\max, P} = \frac{1.1 \times 10^7 \rho_P}{0.23 + \rho_P}$$

从模型参数可以看出,铜绿微囊藻的半饱和速

表 5 铜绿微囊藻最大增长速率和最大藻密度与初始 TP 质量浓度关系的 Monod 模型拟合参数

Table 5 Monod parameters of the maximum growth rate and maximum algal density of *Microcystis aeruginosa*

最大增长速率 Monod 方程拟合参数			最大藻密度 Monod 方程拟合参数		
饱和最大增长速率 R'_{\max} /个·(mL·d) ⁻¹	半饱和速率常数 K_P	相关系数 R	饱和最大藻密度 K' /个·mL ⁻¹	半饱和密度常数 K'_P	相关系数 R
2.7×10^6	0.30	0.98	1.1×10^7	0.23	0.97

率常数和半饱和密度常数都较低,表明在低质量浓度 TP 的再生水中铜绿微囊藻也能够较好的生长。

根据 Monod 方程的形式可知,当 TP 的初始质量浓度远低于半饱和常数时,藻细胞的最大增长速率和最大密度与 TP 初始质量浓度的关系才能满足一级动力学关系,即藻细胞生长会受到磷限制。本研究中,再生水中的 TP 质量浓度需低于 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 才可认为铜绿微囊藻的生长受到磷限制。

Monod 方程表征了 TP 质量浓度与铜绿微囊藻最大密度的关系,而藻密度则可用于表征水华暴发的强度。若以水体中藻密度为 $10^6 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 为水华的标准,通过计算可知 TP 质量浓度需低于 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 才可控制铜绿微囊藻水华的发生。

3 结论

(1) 本试验中,铜绿微囊藻 (*Microcystis*

aeruginosa) 在再生水中的生长潜力大于其他受试藻种,其在 3 种二级出水 (A^2O 、氧化沟和活性污泥) 中的最大藻密度均可大于 $10^6 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$,比生长速率大于 0.39 d^{-1} ,可能引起水华风险。

(2) A^2O -超滤膜过滤-活性炭吸附-氯消毒深度处理工艺没有有效降低铜绿微囊藻的生长潜力,难以减小水华风险。

(3) 再生水中的 TP 浓度能够明显影响铜绿微囊藻的最大密度 (K'_{\max}) 和最大种群增长速率 (R_{\max}),且符合 Monod 方程。

(4) 由 Monod 方程可以推断,当固定 TN 质量浓度为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,再生水中的 TP 质量浓度至少要低于 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 才可认为铜绿微囊藻的生长受到 TP 限制。若以水体中藻密度 $10^6 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 为水华的标准,通过计算可知 TP 质量浓度需低于 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 才可控制铜绿微囊藻水华的发生。

参考文献：

- [1] 胡洪营,魏东斌,王丽莎,等. 污水再生利用指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] Chu J Y, Chen J N, Wang C, *et al.* Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management [J]. *Wat Res*, 2004, **38**(11): 2746-2756.
- [3] Reed S C, Crites R W, Middlebrooks E J. *Natural systems for waste management and treatment*[M]. New York: Lewis Publishers, 1995.
- [4] Metaxa E, Deviller G, Pagand P, *et al.* High rate algal pond treatment for water reuse in a marine fish recirculation system: Water purification and fish health[J]. *Aquaculture*, 2006, **252**(1): 92-101.
- [5] 陈立,王启山,邱慎初,等. 缺水地区性实现水资源良性循环的技术途径[J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(2): 32-33.
- [6] 江雄志,李超,江立安. 石家庄市污水回用现状与发展构想[J]. *中国给水排水*, 2001, **17**(9): 62-64.
- [7] 徐强,刘晓松,唐炎,等. 天津纪庄子污水再生回用试验与工程设计[J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(7): 97-99.
- [8] 肖锦. 城市污水处理及回用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [9] 李丽春,周律,贾海峰,等. 再生水景观功能保障系统的试验研究[J]. *给水排水*, 2005, **31**(8): 6-9.
- [10] 周律,霍振远,甘一萍,等. 以二级出水作为景观补水和冷却水源效益分析[J]. *环境工程*, 2006, **24**(5): 16-18.
- [11] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 275-285.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 种云霄. 浮萍氮磷转化能力的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004. 51-52.
- [14] 丁国际,何星海,高士荣,等. 再生水补充人工湖水对藻类生长影响的试验研究[J]. *给水排水*, 2005, **31**(12): 48-50.
- [15] 刘靖. 北京城市河湖水体富营养化与蓝藻水华研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2005. 47-49.
- [16] 周律,霍振远,甘一萍,等. 以二级出水作为景观补水和冷却水源效益分析[J]. *环境工程*, 2006, **24**(5): 16-18.
- [17] 高学庆,任久长,宗志祥,等. 铜绿微囊藻营养动力学研究[J]. *北京大学学报*, 1994, **30**(4): 461-469.
- [18] 卢大远,刘培刚,范天俞,等. 汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. *环境科学研究*, 2000, **13**(2): 29-31.
- [19] 陈汉辉. 澳大利亚水华的控制和管理[J]. *环境导报*, 1995, (5): 32-33.
- [20] Hilton J, O'Hare M, Bowes M J. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers[J]. *Sci Total Environ*, 2006, **365**(1-3): 66-83.
- [21] Home A J, Goldman C R. *Limnology*[M]. (Second Edition). New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [22] 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.
- [23] 李志伟,崔力拓,齐凤生,等. 铜绿微囊藻生长特性及营养盐对其生长的影响[J]. *水利渔业*, 2006, **26**(1): 65-66.