

再生水回用中氮磷对两种典型水华藻类生长影响研究

周 律¹ 刘晶晶^{1,2} 甘一萍³ 周 军³ 赵 珊³

(1 清华大学环境科学与工程系,北京 100084; 2 北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;
3 北京城市排水集团有限责任公司,北京 100022)

摘要 根据相关标准,试验选取了不同的氮磷浓度值,对蓝藻水华常见的铜绿微囊藻和绿藻水华常见的小球藻分别进行了单独培养以及两者的竞争试验。结果表明,铜绿微囊藻生长的最适氮磷浓度分别为 15 mg/L、0.3~0.5 mg/L,小球藻生长的最适氮磷浓度分别为 15 mg/L、0.1~0.5 mg/L;在氮磷比为 15、30、50、150 的试验条件下,竞争试验中的优势藻均为小球藻。建议以再生水为补水水源的景观水体中,再生水的氮磷浓度分别控制为:总氮 15 mg/L、磷 0.1 mg/L、氮磷比为 150 以上,能有效地抑制铜绿微囊藻生长。

关键词 再生水 景观水体 氮磷 铜绿微囊藻 小球藻 水华

Experimental study on the influences of nitrogen and phosphorus concentrations in reclaimed water on the growth of two typical kinds of algae

Zhou Lu¹, Liu Jingjing^{1,2}, Gan Yiping³, Zhou Jun³, Zhao Shan³

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. Beijing Urban Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: According to the related standards, different concentrations of nitrogen and phosphorus were used in the individual cultivation and competition experiments of the *Microcystis aeruginosa*, a ordinary specie in blue green algae bloom, and the *Chlorella vulgaris*, a common specie in green algae bloom. The results showed that the optimal concentrations of nitrogen and phosphorus for *Microcystis aeruginosa* growth were 15 mg/L, 0.3~0.5 mg/L; and 15 mg/L, 0.1~0.5 mg/L for *Chlorella vulgaris* growth. Under the condition that N:P ratios are 15, 30, 50 and 150, the predominant specie in the competitive experiments is always *Chlorella vulgaris*. It was suggested that, as a water source for aesthetic water, the following parameters for the reclaimed water should be followed: TP 15 mg/L, P 0.1 mg/L, N:P ratio > 150.

Keywords: Reclaimed water; Aesthetic water; Nitrogen and phosphorus; *Microcystis aeruginosa*; *Chlorella vulgaris*; Algal bloom

目前我国已有许多城市将再生水作为城市生态及河湖环境用水,但是由于再生水中氮磷等营养盐含量较高,因此回用于景观水体时,容易暴发水华,产生恶臭,严重影响城市河流和景观水体的景观功能

“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2007BAC22B02)。

和使用功能^[1]。

不同的营养物水平下水体产生的优势藻也不同。一般来说,富营养水体中多暴发蓝藻、绿藻水华^[2];以再生水回用的景观水体暴发水华时多发生小球藻占优势的绿藻水华^[3,4];而国内河湖则大多出现的是微囊藻为优势藻的蓝藻水华^[5,6]。相比而

言,以微囊藻为优势藻的蓝藻水华对景观水体的使用功能影响更大,主要表现在一旦水华暴发,水面出现大量油漆状漂浮物,产生恶臭,并且严重影响水生生物生长。本研究重点从控制再生水水质方面研究不同的氮、磷浓度及比例对常见的蓝藻和绿藻水华的优势藻——铜绿微囊藻和小球藻生长及竞争的影响情况,以期避免景观水体中以微囊藻为优势藻的蓝藻水华发生,并为控制以再生水为补水的城市河湖中水华暴发提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料

试验所用铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 购自中国科学院武汉水生生物研究所。试验用培养基为铜绿微囊藻和小球藻均适宜的 BG11 培养基^[7],在配置不同的氮磷浓度时,以培养基为基础,用 NaNO_3 和 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 改变氮磷浓度及比例。

1.2 方法

1.2.1 培养方法

将 200 mL 的无氮磷的培养基加入洁净的 500 mL 锥形试验瓶,加盖封口膜,然后在高压消解锅中以 1 个大气压、121.5 °C 条件下灭菌 30 min。在无菌操作台进行接种后,将试验瓶放入人工气候箱内进行培养。培养温度为白天 30 °C、晚上 25 °C,光暗比 14 h : 10 h,光强 3 000 lx,湿度 66%。白天每隔 3~4 h 摇动一次,为减少光照不均匀的影响,在定期摇动的同时更换试验组锥形瓶的位置。

1.2.2 计数方法

自接种次日开始计数,每天定时在生物显微镜下采用血球计数板计数,每个样品重复计数两次,藻细胞数量采用血球计数板法计数公式^[8]。

1.3 营养条件

为准确的研究以再生水为背景条件下的藻类生长规律,试验中有针对性地选取了 4 个磷浓度值,分别是: TP=0.02 mg/L (水体富营养化浓度)^[4], TP=0.3 mg/L (北京 2008 年奥运森林公园景观湖再生水补水设计值)^[9], TP=0.5 mg/L [《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2002)], TP=1.0 mg/L (《城市污水再生利用 景观环境用水水质》回用于河道类景观水体标准要求)。此外按照现行

《城市污水再生利用 景观环境用水水质》标准选取 TN=15 mg/L。试验中设定的氮磷比例分别为 15、30、50、150,其余氮浓度按照氮磷比及给定的磷浓度计算得出。氮磷浓度及比例见表 1。

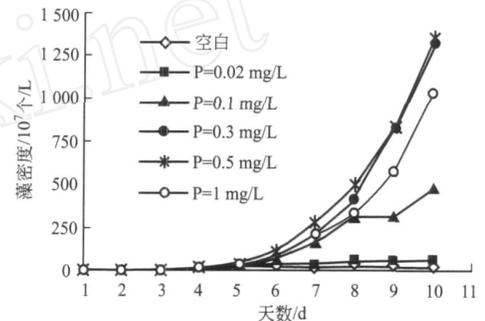
表 1 试验中采用的氮磷浓度及比例

营养盐浓度	氮磷比				
	15	30	50	150	750
N = 15 mg/L	P = 1	P = 0.5	P = 0.3	P = 0.1	P = 0.02
P = 0.3 mg/L	N = 4.5	N = 9	N = 15	N = 45	

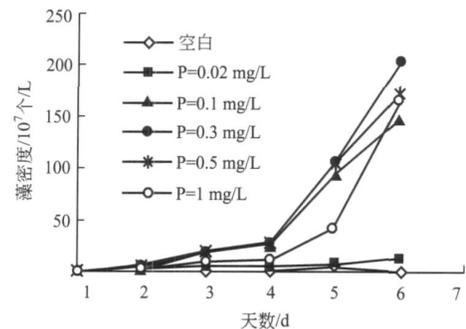
2 结果与分析

2.1 磷对藻类生长及竞争的影响

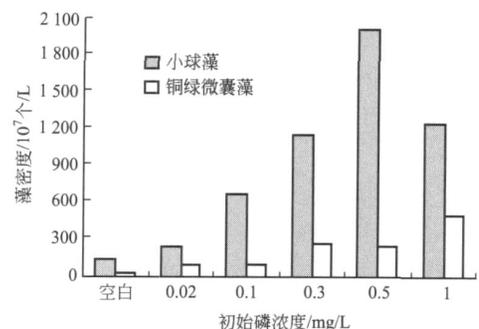
在氮浓度为 15 mg/L 不变的条件下,小球藻和铜绿微囊藻随初始磷浓度变化的生长曲线见图 1。



a 单独培养铜绿微囊藻在不同的初始磷浓度时的生长曲线



b 单独培养小球藻在不同的初始磷浓度时的生长曲线



c 不同磷浓度小球藻和铜绿微囊藻竞争试验结果

图 1 小球藻和铜绿微囊藻随磷浓度变化曲线

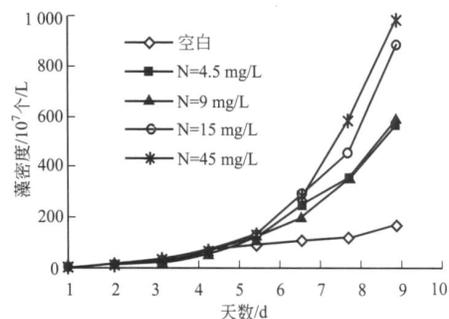
试验开始时,单独培养铜绿微囊藻的接种密度为 3×10^7 个/L。从图 1a 中可以看出:经过 10 天的培养期,同一时刻铜绿微囊藻的生长速率随磷浓度的变化趋势依次为: $0.5 \text{ mg/L} > 0.3 \text{ mg/L} > 1 \text{ mg/L} > 0.1 \text{ mg/L} > 0.02 \text{ mg/L}$, 即当 $\text{TN} = 15 \text{ mg/L}$ 时, $0.3 \text{ mg/L} < \text{TP} < 0.5 \text{ mg/L}$ 为最适生长区间,此时氮磷比介于 30 ~ 50。试验过程中发现铜绿微囊藻对磷的吸收量随着初始磷浓度的增加而增加,而对氮的吸收量则随着初始磷浓度的增加呈先增加,然后趋于稳定的趋势,转折点出现在初始磷浓度为 0.3 mg/L 的条件下。从试验中可以得出:不同初始磷浓度对藻类吸收氮磷量有一定的影响。磷浓度小于 0.3 mg/L 时能够抑制铜绿微囊藻的生长,相应抑制其对氮的吸收量;为了控制铜绿微囊藻的生长建议将再生水中总磷浓度控制在 0.1 mg/L 以下。

单独培养小球藻的接种密度为 2×10^6 个/L,从图 1b 中可以看出:经过 6 天的人工培养期,同一时刻小球藻的生长速率随磷浓度的变化趋势基本为: $0.3 \text{ mg/L} > 0.5 \text{ mg/L} > 0.1 \text{ mg/L} > 1 \text{ mg/L} > 0.02 \text{ mg/L}$, 即当 $\text{TN} = 15 \text{ mg/L}$ 时, $0.1 \text{ mg/L} < \text{TP} < 0.5 \text{ mg/L}$ 为最适生长区间,此时氮磷比介于 30 ~ 150。试验过程中发现小球藻对氮磷的吸收量均随着初始磷浓度的增加而增加。可见:磷浓度小于 0.1 mg/L 时能够抑制小球藻的生长,相应抑制其对氮的吸收量;为了控制小球藻的生长,建议将再生水中总磷浓度控制在 0.02 mg/L 以下。

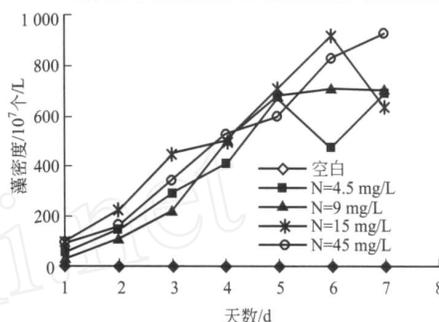
竞争试验中铜绿微囊藻和小球藻的接种密度均为 3×10^7 个/L,从图 1c 中可以发现:无论初始磷浓度为多少,同一时间点处,小球藻的绝对量均大于铜绿微囊藻的量。到试验结束时,不同的初始磷浓度下,小球藻藻密度为铜绿微囊藻密度的 2.5 ~ 8 倍,小球藻均表现为优势藻。

2.2 氮对藻类生长及竞争的影响

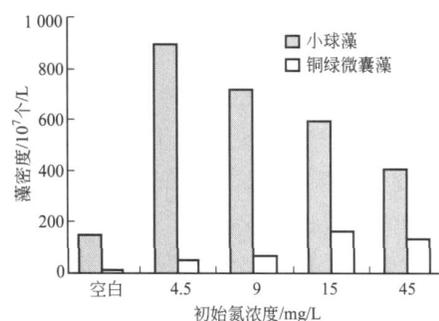
在磷浓度 0.3 mg/L 不变的条件下,小球藻和铜绿微囊藻随初始氮浓度变化的生长曲线如图 2 所示。试验开始时,单独培养铜绿微囊藻的接种密度为 3.5×10^7 个/L。从图 2a 中可以看出:经过 8 天的人工培养期,同一时刻铜绿微囊藻的生长速率随着初始氮浓度的增大而增加,依次为 $45 \text{ mg/L} > 15 \text{ mg/L} > 9 \text{ mg/L} > 4.5 \text{ mg/L}$ 。当初始磷浓度为 0.3



a 单独培养铜绿微囊藻在不同初始氮浓度时的生长曲线



b 单独培养小球藻在不同初始氮浓度时的生长曲线



c 不同氮浓度小球藻和铜绿微囊藻竞争试验结果

图 2 小球藻和铜绿微囊藻随氮浓度变化曲线

mg/L 时,铜绿微囊藻的生长会受到氮含量的影响,但影响很小。磷元素含量一定的条件下,铜绿微囊藻对氮、磷元素的吸收量也较一致。与图 1a 相比,磷仍然是藻类生长的主要限制因素。

单独培养小球藻的接种密度为 3×10^6 个/L。从图 2b 中可以看出:经过 8 天人工培养的生长曲线中,当初始磷浓度为 0.3 mg/L 时,各个不同氮浓度条件下小球藻的生长速率并不随着初始氮浓度的变化发生明显变化,生长趋势大体一致。说明在一定浓度范围内,小球藻对氮浓度的变化很不敏感。

竞争试验中铜绿微囊藻和小球藻的接种密度均为 3×10^7 个/L。从图 2c 可知:经过 7 天的人工培养,当初始磷浓度为 0.3 mg/L 时,无论氮浓度是多

少,至试验结束时,小球藻密度为铜绿微囊藻密度的3~19倍,小球藻均是优势藻。

3 讨论

1966年日本 Sakamoto 对日本湖泊进行对比分析的统计结果:当 $TN/TP < 10$ 时,氮成为夏季藻类生长的限制性因素的可能性非常大;当 $TN/TP > 17$ 时,磷成为夏季藻类生长的限制性因素的可能性非常大;当 TN/TP 为 $10 \sim 17$ 时,夏季藻类的生长会受到氮、磷的双重制约^[10]。这个结论在1981年得到 Forsberg 的充分肯定^[11]。

本试验得出:在试验设定的氮磷比例下,氮浓度为 15 mg/L 、磷浓度为 $0.02 \sim 1 \text{ mg/L}$ 的试验组中小球藻的生长趋势变化很明显。在磷浓度为 0.3 mg/L 、氮浓度为 $4.5 \sim 45 \text{ mg/L}$ 的试验组中小球藻生长基本一致。说明了氮磷比对藻类生长的影响与氮磷绝对浓度密切相关,即在一定氮磷浓度范围内,氮磷比对藻类生长有明显的影响作用,如果超过某一氮磷浓度范围值则影响作用不明显。因此在特定的水环境中应综合考虑氮磷浓度及比例对藻类生长的影响。

同时在本试验条件下,两种典型水华藻类的竞争试验中小球藻均表现为优势藻。原因可能是氮磷比大于15时,即在含氮量(硝酸盐)相对丰富的水体中小球藻更容易成为优势藻。

在本试验确定的两组营养条件下,保持氮浓度为 15 mg/L 不变时,小球藻和铜绿微囊藻随磷浓度变化的生长状况,均出现最适生长的氮磷浓度点。小球藻生长最适合的磷浓度为 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/L}$,氮磷比为 $30 \sim 150$;而铜绿微囊藻为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg/L}$,氮磷比为 $30 \sim 50$;保持磷浓度为 0.3 mg/L 不变的条件下,氮含量对小球藻和铜绿微囊藻生长的影响几乎一致,两种藻在各个氮浓度下的生长繁殖速率基本相等。说明磷仍然是小球藻和铜绿微囊藻的主要限制因素。

4 结论

(1) 试验研究中,当氮含量为 $4.5 \sim 45 \text{ mg/L}$,磷含量为 $0.02 \sim 1 \text{ mg/L}$ 的培养条件下,小球藻的竞争力总是强于铜绿微囊藻。

(2) 当初始氮浓度为 15 mg/L 时,两种藻随磷浓度变化较明显,小球藻生长最适磷浓度为 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg/L}$,氮磷比为 $30 \sim 150$;而铜绿微囊藻为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mg/L}$,氮磷比为 $30 \sim 50$ 。

(3) 以再生水为补水水源的景观水体中,为了抑制铜绿微囊藻的生长,建议再生水中总氮浓度 15 mg/L 、磷浓度 0.1 mg/L ;如为抑制小球藻的生长,建议再生水中总氮浓度 15 mg/L 、磷浓度 0.02 mg/L 。

(4) 在特定的水环境中应综合考虑氮磷浓度及比例对藻类生长的影响。与微囊藻相比,小球藻无藻毒素、利于水生动物捕食、漂浮体少等,对水环境的不良影响明显低于微囊藻。因此如果以再生水作为景观用水的补水时,处理工艺重点以磷的去除为主,同时考虑氮的去除,以改变水中营养物的比例,破坏藻类的营养平衡,进而降低有害藻类水华的发生,提高以再生水为补水的景观水体的使用功能。

参考文献

- 1 周律,邢丽贞,段艳萍.再生水回用于景观水体的水质要求探讨.给水排水,2007,33(4):38~42
- 2 李春丽,周律,贾海峰.再生水景观功能保障系统的试验研究.给水排水,2005,31(8):6~9
- 3 吴薇薇,周律,邢丽贞,等.再生水回用于人工景观水体优势藻和水华指示指标的研究.给水排水,2007,33(增刊):72~74
- 4 金相灿,屠清英.湖泊富营养化调查规范.北京:中国环境科学出版社,1990:13~14
- 5 段艳萍.北京什刹海水华控制和水质维护的试验研究:[学位论文].西安:西安建筑科技大学,2006
- 6 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类-系统、分类及生态.北京:科学出版社,2006
- 7 胡小贞,马祖友,易文利,等.4种不同培养基下铜绿微囊藻和四尾栅藻生长比较.环境科学研究,2004,17(增刊):55~57
- 8 周群英,高廷耀.环境工程微生物学.北京:高等教育出版社,2000.292~293
- 9 郝二成,周军,甘一萍.奥运公园再生水利用研究.水信息网.(2006-05-17) <http://www.hwcc.com.cn/newsdisplay/newsdisplay.asp?Id=149678>
- 10 Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. Archiv für Hydrobiologie, 1966, 62:1~28
- 11 Forsberg C. Present knowledge on limiting nutrient. Washington DC:Springer, 1981

& 电话:(010)62773079

E-mail:zhoul@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2008-12-10

修回日期:2009-02-12