

王蕾,石利利,蔡道基. 2011. 利用络氨铜控制景观水体藻华[J]. 环境科学学报, 31(11): 2440-2446

Wang L, Shi L L, Cai D J. 2011. Controlling algal blooms in the landscape water with copper sulfate-ammonia complex [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(11): 2440-2446

利用络氨铜控制景观水体藻华

王蕾,石利利* 蔡道基

环境保护部南京环境科学研究所,国家环境保护农药环境评价与污染控制重点实验室,南京 210042

收稿日期:2011-01-27 修回日期:2011-04-12 录用日期:2011-04-26

摘要:研究了络氨铜对不同生长期的典型蓝藻(铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa*) 15 d 生长抑制影响的基础上,开展了络氨铜对不同时期景观池水中叶绿素 a 含量的影响,并跟踪测定了其中的有效铜离子浓度变化.结果表明,络氨铜在 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (络氨铜的有效浓度,下同) 时,可完全抑制适应期铜绿微囊藻的生长;在 4 d 内显著降低 4 月份景观池水中叶绿素 a 的含量 ($p < 0.05$) 并抑制藻类的生长.络氨铜对铜绿微囊藻适应期的生长抑制率高于其对数生长期,对 4 月份景观池水中叶绿素 a 的去除效果优于其对 3 月份和 5 月份池水中叶绿素 a 的去除效果.因此,在藻类生长早期投加络氨铜控藻有利于达到快速、高效控藻的目的.

关键词:络氨铜;铜绿微囊藻;景观水体;叶绿素 a;藻华

文章编号:0253-2468(2011)11-2440-07 中图分类号:X171 文献标识码:A

Controlling algal blooms in the landscape water with copper sulfate-ammonia complex

WANG Lei, SHI Lili*, CAI Daoji

Nanjing Institute of Environmental Sciences/Key laboratory of Pesticide Environmental Assessment and Pollution Control, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042

Received 27 January 2011; received in revised form 12 April 2011; accepted 26 April 2011

Abstract: The effect of copper sulfate-ammonia complex on *Microcystis aeruginosa* (the dominant algae of Cyanobacteria algal bloom) was determined by a 15-day prolonged growth inhibition test in a landscape water sample. Elimination of chlorophyll-a was also studied. The results indicated that copper sulfate-ammonia complex at $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ could completely inhibit the growth of *Microcystis aeruginosa* at the lag phase and significantly decrease the concentration of chlorophyll-a in the landscape water sample in 4 days. Copper sulfate-ammonia complex showed a greater algacidal effect for *Microcystis aeruginosa* at lag phase than at log phase, and a greater elimination effect for chlorophyll-a in the landscape water sample collected in April than in March and May. Therefore, better algacidal effects can be achieved when the copper sulfate-ammonia complex was applied in early phase of algal bloom.

Keywords: copper sulfate-ammonia complex; *Microcystis aeruginosa*; landscape water; chlorophyll-a; algal bloom

1 引言(Introduction)

景观水体是现代城市建设中不可或缺的组成部分,在美化都市生活、满足人们精神享受方面起着重要作用.然而由于景观水体多为封闭、半封闭的水域,其流动性差、自身水环境容量小、自净能力低的特点导致景观水体在适宜的水文气象条件及人为干扰下极易滋生藻类,甚至造成“水华”爆发(邢丽贞等,2001).藻害的出现不仅严重损害了景观水体的观赏价值,其散发的恶臭及产生的藻毒素

还可能危害周围居民的身体健康.

新近的研究表明络合铜是一种新型、高效的控藻剂,其控制蓝藻的有效剂量比使用传统的硫酸铜除藻剂少一半以上(王蕾等,2011;开根森,2010;周律等,2009).与此同时,由于络合铜不易与自然水环境中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 S^{2-} 等无机配位体和腐殖质、洗涤剂、EDTA 等有机配位体结合,因此比硫酸铜具有更长的有效作用期(刘光钊,2005;Raman,1985,1988).此外,低浓度的络合铜在有效控制蓝藻的同时对非靶标生物也具有比较高的安全性(周律等,

基金项目:国家科技重大专项课题(No. 2009ZX07101-011)

Supported by the Key Projects in the National Science & Technology (No. 2009ZX07101-011)

作者简介:王蕾(1983—),女,E-mail: wanglei@nies.org; * 通讯作者(责任作者),E-mail: sl@nies.org

Biography: WANG Lei (1983—), female, E-mail: wanglei@nies.org; * Corresponding author, E-mail: sl@nies.org

2009; 开根森, 2010; 陈漫漫等, 2010). 正是由于其较高的控藻效能和较高的环境安全性, 经美国环保署核定, 络合铜一直是加州, 特别是洛杉矶地区的水库或蓄水区应用最多的除藻剂之一(开根森, 2010). 然而由于我国对络合铜控藻缺乏深入理论研究和应用技术探索, 络合铜控藻在我国至今尚未得以应用.

天然水体中的藻类种群主要由蓝藻、绿藻和硅藻三大类组成, 其中蓝藻水华近年来在我国内陆河湖(如江苏太湖、安徽巢湖和云南滇池等)爆发的数量和频率均居首位(金相灿, 1995; 陆源等, 2001). 蓝藻水华的爆发一般经历越冬、复苏、生物量增加和上浮聚集 4 个阶段. 在这 4 个阶段中, 藻类的生理特征及其主导生态因子完全不同(孔繁翔等, 2005). 因此, 根据其不同的生理阶段特征有针对性地进行蓝藻水华控制才能收到事半功倍的效果. 为此, 按照微生物生长繁殖在适应期、对数期、静止期和衰亡期的不同特征, 采用实验室分批培养的方式模拟络合铜对不同生长阶段蓝藻的作用效果做出判断. 有研究表明在藻细胞浓度较高的水华爆发期进行化学杀藻将造成死亡藻体腐败耗氧而损害水环境质量, 并可能导致与水华浓度有关的胞内毒素高浓度释放(刘光钊, 2005; 开根森, 2010). 因此实验室模拟络合铜对细胞浓度较低的适应期和对数期蓝藻的抑制效果具有更大的实际意义.

已有研究结果表明, 络氨铜作为一种典型的铜络合剂, 其控藻效果远远高于传统硫酸铜杀藻剂(王蕾等, 2011). 在此基础上, 本文以铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)为蓝藻的典型代表, 深入研究络氨铜对不同生长阶段蓝藻的生长抑制效应, 同时结合络氨铜对不同时期景观水体中指示藻浓度的叶绿素 a 含量的影响, 初步判断络氨铜控制景观藻害有效施用量及最佳施用期, 为进一步探索络氨铜控藻方法体系提供技术支持.

2 材料和方法(Materials and methods)

2.1 试验材料

(1) 铜绿微囊藻: *Microcystis aeruginosa*, 藻种购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库(FACHB), 编号为 FACHB469.

(2) 景观水体藻华样本: 景观水体藻华样本取自南京环境科学研究所人工湖. 该湖于 2007 年注入地下水并养殖鱼类作为景观湖, 湖水每 6~7 个月以

地下水更新一次. 试验开始时池水于 2009 年 10 月 8 日进行最近一次更换, 直至试验结束时都未更换. 由于湖水流动性差、光照充足, 且鱼类饵料和粪便等营养物质的长期存在, 使湖水处于富营养化状态, 造成藻类繁殖, 湖水呈蓝绿色. 由于藻类一般在接近水面的浅层水中生长繁殖(黄萌, 2006), 而且受光照条件和水温影响, 因此本研究在 2010 年 3、4、5 月分别在同一时间、同一地点、同一液面深度采集湖水表层水样, 采样时湖水的相关参数如表 1 所示.

表 1 湖水表层水样参数

Table 1 Main parameters of water samples collected from the lake

采样日期	水温 / $^{\circ}\text{C}$	pH	溶解氧(DO) / $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	COD / $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
2010-03-19 上午	11.6	8.27	10.78	32.6
2010-04-23 上午	15.7	7.74	9.72	42.4
2010-05-28 上午	22.3	7.62	8.53	84.6

(3) 25% 络氨铜水剂, 深蓝色液体, 有效成分为络氨铜{ $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}\cdot\text{X}^{2-}$ } (其中 X 为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等阴离子).

(4) 主要仪器设备: 振荡培养箱(INNOVA 43R, NBS 公司); 照度计(ZDS-10, 上海嘉定学联仪表厂); 高压蒸汽灭菌器(MLS-3750, 日本三洋公司); 紫外/可见分光光度计(UV-1700, SHIMADZU); 显微镜(BH-2, Olympus Corporation); 温湿度计(SQ6HM10, 武汉中西仪器公司); 250 mL 锥形瓶(250 mL, 天玻仪器厂)、血球计数板(上海医学用品仪器厂)、原子吸收分光光度计(AAnalyst 800, Pekin Elmer).

2.2 试验方法

2.2.1 铜绿微囊藻预培养 铜绿微囊藻采用 BG11 培养基于光照振荡培养箱中培养. 培养条件为: 温度(24 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 光强 3000 lx ($\pm 15\%$), 光暗周期 16 h:8 h, 振荡速度为(100 ± 10)次 $\cdot\text{min}^{-1}$. 试验开始之前, 对藻类预培养 5 个周期, 每个周期 4 d, 保证试验藻的生物活性和同步生长. 镜检细胞正常, 进入对数生长期时进行试验. 藻类计数时, 以 BG11 培养基为参比, 在 680 nm 波长下测定吸光度值(OD_{680}), 并以血球计数板进行藻细胞浓度计数, 最终得到吸光度值(y)与藻细胞浓度(x , 单位: $\times 10^4$ cells $\cdot\text{mL}^{-1}$)的线性回归方程为 $y = 2212.722x - 16.051$ ($R^2 = 0.998$). 试验时利用该方程在测定藻液 680 nm 波长下吸光度值的基础上计算藻细胞浓度.

2.2.2 铜绿微囊藻生长曲线的测定 在 250 mL 锥形瓶中加入 100 mL 培养基并高压灭菌, 在无菌条件下接种对数生长期的藻类, 使藻细胞初浓度达到 $6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 按照上述预培养条件在光照培养箱中分批培养 12 d, 定期测定藻液吸光度. 最后以藻液 680 nm 波长下测定吸光度值 (OD_{680}) 为纵坐标, 以时间 (hours) 为横坐标, 得到铜绿微囊藻生长曲线.

2.2.3 不同生长阶段铜绿微囊藻 15 d 生长抑制试验 采用与生长曲线测定相同的方法, 在 250 mL 锥形瓶中加入 100 mL 培养基并高压灭菌, 在无菌条件下接种对数生长期的藻细胞, 使藻细胞初浓度达到 $6 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$. 根据初步试验的结果, 设置 0.01、0.03、0.05、0.10、0.25 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5 个络氨铜暴露浓度 ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 为有效浓度单位, 下同), 每个浓度 3 个平行, 同时设置 3 个空白对照组. 根据生长曲线测定结果确定铜绿微囊藻生长的适应期和对数期, 并在这两个不同时期分别投药. 藻液染毒后置于光照培养箱中按上述条件进行培养. 在 0 (即为投药当天)、1、2、3、4、7、10、13、15 d 测定藻液 680 nm 处的吸光度 (OD_{680}) 值并计算相应的藻细胞浓度.

景观湖水样试验: 在 250 mL 锥形瓶中加入 100 mL 实际水样并测定水样中初始的叶绿素 a 含量. 试验时, 设置 0.10、0.25 和 0.50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 3 个络氨铜暴露浓度, 每个浓度 3 个平行, 同时设置 3 个空白对照组. 水样染毒后置于光照培养箱中按上述条件进行培养. 在 0、4、10、15 d 测定水样中叶绿素 a 的含量.

2.3 叶绿素 a 含量的测定

取 20 mL 暴露处理的景观湖水样, 4000 g 离心 10 min, 去上清, 加入 5 mL (80%) 丙酮溶液, 摇匀, 在暗处抽提 24 h, 再 10000 g 离心 10 min, 取上清置于紫外/可见分光光度计中, 以 80% 丙酮溶液为空白对照, 分别测定样本在 663 nm 和 645 nm 处的吸光度值. 采用公式 (1) 计算叶绿素 a 含量 (李合生等 2003; 王莉等, 2009):

$$c_a = \frac{(12.21\text{OD}_{663} - 2.81\text{OD}_{645}) V_1}{V\delta} \quad (1)$$

式中 c_a 表示叶绿素 a 含量, 单位均为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; V_1 表示用 80% 丙酮定容后的提取液体积 (mL); V 表示水样体积 (L); δ 表示比色皿光程 (cm).

2.4 铜浓度分析

用 10% HCl 溶液配制浓度分别为 0.1、0.2、0.5、0.8、1.0、2.0、4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铜离子标准溶液,

用原子吸收分光光度计 (火焰法) 测定标准曲线为 $y = 0.040x + 2 \times 10^{-6}$, $R^2 = 0.999$, 式中 y 为 324.8 nm 处的吸光度 x 为铜离子浓度.

在景观湖水样藻类生长抑制试验中, 在第 0、1、2、4、7、10、17、30 d 分别取浓度为 0.50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的受试溶液, 1000 g 离心 5 min 后, 取上清液用原子吸收分光光度计 (火焰法) 分析铜含量.

2.5 数据处理与分析

在景观湖水样藻类生长抑制试验中, 采用单因素方差分析 (ANOVA, SPSS 17.0) 比较各处理组 and 对照组中叶绿素 a 含量, 确定两者在 $p = 0.05$ 水平上是否存在显著性差异.

3 结果 (Results)

3.1 铜绿微囊藻生长曲线

用 680 nm 处的吸光度值 (OD_{680}) 表示试验容器中藻类的生物量, 以 OD_{680} 作为纵坐标, 以培养时间 (h) 作为横坐标, 得到本实验条件下 0 ~ 12 d 的铜绿微囊藻生长曲线如图 1 所示.

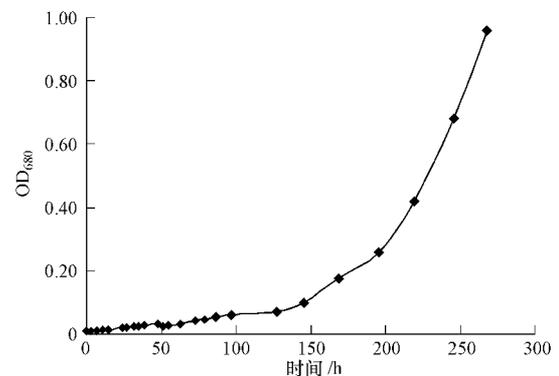


图 1 铜绿微囊藻 0 ~ 12 d 生长曲线

Fig. 1 The growth curve of *Microcystis aeruginosa* in 12 days

由图 1 可知, 铜绿微囊藻在 0 ~ 48 h (即 0 ~ 2 d) 内, 细胞浓度维持在初始水平, 没有显著的变化, 此即为适应期的初始阶段. 48 ~ 144 h (即 2 ~ 6 d) 内, 细胞浓度缓慢增加, 此即为适应期的第二阶段, 即加速期. 自 144 h (第 6 d) 开始到实验结束 (12 d), 细胞数量以几何级数快速增加, 其生长曲线接近于指数函数曲线, 因此该阶段为铜绿微囊藻生长的对数期, 即指数期.

3.2 络氨铜对不同生长阶段铜绿微囊藻的抑制作用

在确定铜绿微囊藻生长曲线的基础上, 选择第 24 h 和第 150 h 作为藻类生长适应期和对数期典型

时间点分别进行投药. 图 2 和图 3 分别为 25% 络氨铜水剂对适应期和对数生长期铜绿微囊藻在 0 ~ 15 d 的生长抑制效果.

由此可知 0.01 ~ 0.25 mg·L⁻¹ 络氨铜对适应期和对数生长期铜绿微囊藻均有一定的生长抑制作用. 适应期藻在 0 ~ 4 d 暴露时期内, 对照组藻细胞浓度均维持在较低水平, 第 4 ~ 7 d 开始缓慢增长, 7 d 后对照组即开始对数增长, 0.01 ~ 0.05 mg·L⁻¹ 处理组藻细胞增长趋势与空白对照组相近, 但生长速率显著低于对照组, 而络氨铜 0.10 ~ 0.25 mg·L⁻¹ 处理组藻细胞浓度在 0 ~ 15 d 内均维持在初始水平

甚至进一步减少. 对数期藻在 0 ~ 15 d 期间, 空白对照组藻细胞均以较快的速率增长, 0.01 ~ 0.10 mg·L⁻¹ 处理组藻细胞增长趋势与空白对照组相近, 但生长速率不同程度地低于对照组, 而 0.25 mg·L⁻¹ 络氨铜处理组藻细胞浓度在 0 ~ 15 d 内均维持在初始水平甚至进一步减少. 由此可见, 在适应期完全抑制藻细胞增长需投加 0.10 mg·L⁻¹ 的络氨铜, 而在对数增长期则至少需投加 0.25 mg·L⁻¹ 络氨铜才可完全抑制藻细胞生长. 因此选择在藻类生长的早期(适应期)投加络氨铜优于对数增长期, 较低的投加量即可达到完全抑藻的目的.

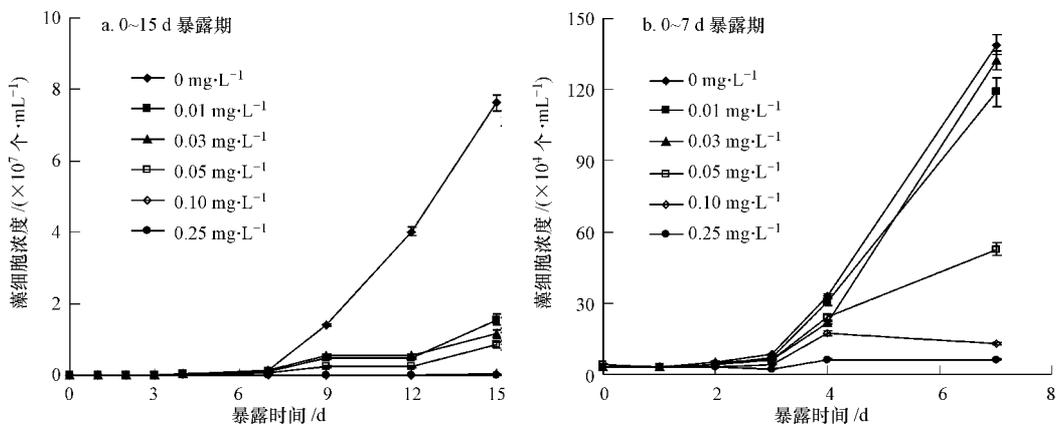


图 2 不同浓度络氨铜暴露下适应期铜绿微囊藻的生长曲线

Fig. 2 The growth curve of *Microcystis aeruginosa* at the lag phrase exposed to copper sulfate-ammonia complex

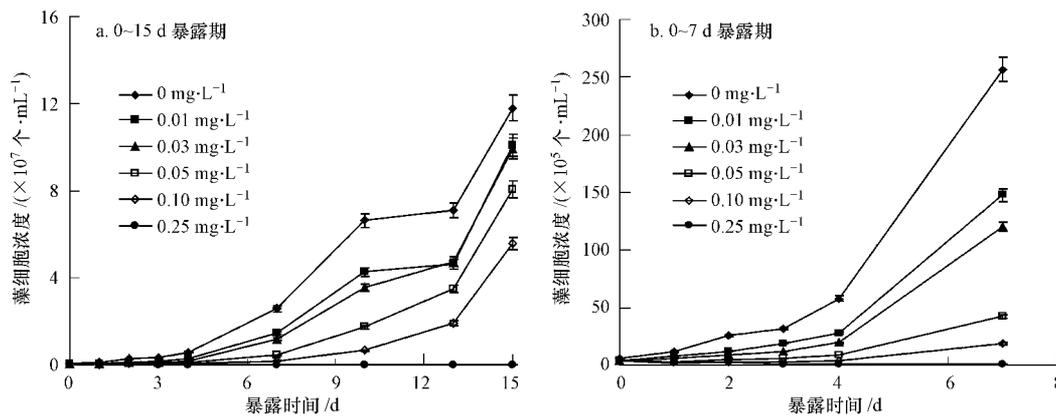


图 3 不同浓度络氨铜暴露下对数期铜绿微囊藻的生长曲线

Fig. 3 The growth curve of *Microcystis aeruginosa* at the log phrase exposed to copper sulfate-ammonia complex

3.3 络氨铜对不同时期景观水体中叶绿素 a 含量的影响

叶绿素 a 含量是反映实际水样中藻类总体水平的综合指标(王莉等, 2009; 赵玉华等, 2007), 图 4 为 0.10 ~ 0.50 mg·L⁻¹ 络氨铜对 3 月份、4 月份和 5

月份景观水体中叶绿素 a 含量影响的模拟试验结果.

景观湖水样 0 d 时的叶绿素含量反映了水体中全部藻类的浓度. 由图 4 可知 3 月份和 4 月份湖水中叶绿素 a 的含量均维持在 50 mg·m⁻³ 左右, 而 5

月底则增长一倍,达到 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右. 这说明湖水中藻细胞已结束适应环境的复苏期,开始进入大量增长的对数增长期,并可能出现大爆发. 这与已有研究得到的蓝藻生消规律是相似的(孔繁翔等, 2005).

对比处理组与空白对照组在不同暴露时期的叶绿素含量可知,在 $0 \sim 15 \text{ d}$ 暴露期内, $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 络氨铜可对 4 月份景观水体中藻类呈现出比较显著的抑制作用,而对 3 月份和 5 月份景观水体中藻类的抑制作用显著性降低; $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 络氨铜对 3 月份和 4 月份景观水体中藻类暴露 4 d 后直至 15 d 试验结束均呈现出显著的抑制作用,但对 5 月份景观水体中藻类均在第 10 d

才出现显著抑制作用. 在第 15 d 时,络氨铜需达到 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 才能够显著抑制 5 月份景观水体中藻类的生长.

综合上述实验结果 $0.10 \sim 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 络氨铜对 4 月份景观水体中藻类均出现较显著的抑制作用,这说明藻类复苏时期可能是最佳的络氨铜控藻投药时机. 这可能是由于藻细胞在早期复苏阶段能与自然水体中其他有机物形成一种“需铜体”,因而铜吸收效率较高(刘光钊, 2005). 此外,4 月份水体中较低的化学需氧量(COD)反映了该阶段水体有机质含量尚处于较低水平,因此不会为藻类生长提供充分的营养条件,因此这也为有效控制藻类生长提供了必要条件.

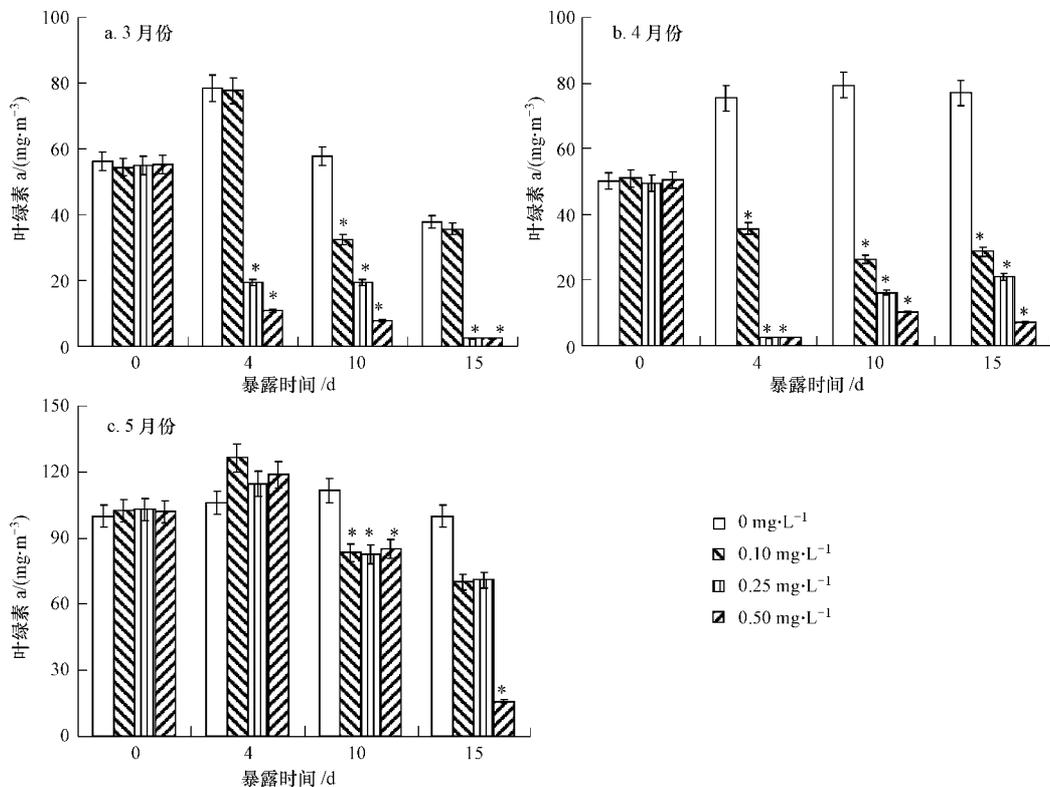


图 4 络氨铜对 3 月份、4 月份和 5 月份景观水体中叶绿素 a 含量的影响 (* . $p < 0.05$)

(注: 3 月份景观水体空白对照组叶绿素 a 在试验后期(4 ~ 15 d)降低,这可能是由于此时水体中有机质水平较低而无法满足藻类在试验强光照条件下的生长需求所造成的)

Fig. 4 The elimination effect of copper sulfate-ammonia complex for chlorophyll-a in the landscape water sample collected in March, April and May (* . $p < 0.05$)

3.4 络氨铜在水体中稳定性

对景观湖水藻类抑制试验络氨铜浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 水样中的铜离子浓度进行跟踪测定的结果如图 5 所示. 由图可以看出,景观水样中铜离子的浓度在 $0 \sim 7 \text{ d}$ 均比较稳定,第 10 d 却降低 50% 左右. 这一方面可能是由于天然水体中 OH^- 、 CO_3^{2-} 、 S^{2-} 等

无机配位体和腐殖质、洗涤剂、EDTA 等有机配位体不断结合铜离子而沉淀而造成的,另一方面,藻类本身也有富集铜离子的能力,削减的铜离子可能被藻类吸附或吸收(刘光钊, 2005). 由此可见络氨铜控藻应该控制在 7 d 之内,否则控藻效能将大大缩减.

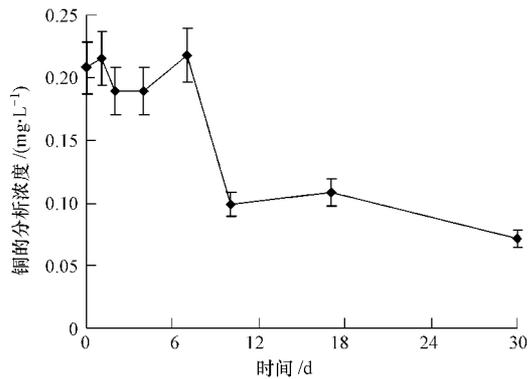


图5 络氨铜受试介质中铜浓度(络氨铜理论浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Fig.5 The concentration of copper ions created by the copper sulfate-ammonia complex (nominal concentration of $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) in the landscape water sample

4 结论(Conclusions)

1) 络氨铜投入景观水样中后,其有效铜离子浓度在7 d之内比较稳定,7 d之后将有所降低。因此络氨铜控藻最好应能在7 d之内达到显著效果,即控藻效果的时效性是络氨铜控藻效果的一个重要指标。

2) 在铜绿微囊藻生长的早期(适应期), $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 络氨铜即可达到完全抑藻的目的;而在对数期生长期,络氨铜的浓度须提高到 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 才能完全抑制铜绿微囊藻的生长。在含有多种藻类的复杂景观水样中, $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 络氨铜即可在4 d内显著降低4月份水样中藻类总量,此时该水体中藻类正处于复苏阶段;而该剂量对处于复苏前期的3月份水体藻类和处于快速增殖的5月份水体藻类的控制却未能在4d内即达到显著效果。因此选择在藻类生长早期(复苏期)投加络氨铜可以在高效控制藻类生长的同时最大限度地减少外源性化学制剂对生态环境的干扰。

责任作者简介:石利利(1965—),女,硕士,研究员,主要从事农药环境行为与农药环境安全评价研究工作。

参考文献(References):

陈漫漫,李小平. 2010. 络合铜除藻剂对藻类水华控制和生态安全评价[A]. 第二届环境污染防治应用技术交流会议论文集[C]. 杭州. 60-63

Chen M M, Li X P. 2010. Controlling algal blooms by copper sulfate-ammonia complex and ecological safe assessment [A]. The second environmental pollution prevention technique exchanging meeting

proceedings [C]. Hangzhou. 60-63 (in Chinese)

黄萌. 2006. 富营养化对水生生态系统的污染生态效应[J]. 科技情报开发与经济, 16(20): 137-138

Huang M. 2006. The Pollutional Ecological Effect of Eutrophication on the Aquatic Ecosystem [J]. Sci-tech Information Development & Economy, 16(20): 137-138 (in Chinese)

金相灿. 1995. 中国湖泊环境[M]. 北京: 海洋出版社. 24-25

Jin X C. 1995. Lake Environment in China [M]. Beijing: Ocean Press. 24-25 (in Chinese)

孔繁翔, 高光. 2005. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 25(3): 589-595

Kong F X, Gao G. 2005. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes [J]. Acta Ecologica Sinica, 25(3): 589-595 (in Chinese)

开根森. 2010. 美国控制蓝藻生长的经验[A]. 第二届环境污染防治应用技术交流会议论文集[C]. 杭州. 44-48

Kai G S. 2010. An U. S. approach to control algal growth [A]. The second environmental pollution prevention technique exchanging meeting proceedings [C]. Hangzhou. 44-48 (in Chinese)

李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 2003. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社. 134-137

Li H S, Sun Q, Zhao S J, et al. 2003. Principles and Technologies for Plant Physiology and Biochemistry Experiments [M]. Beijing: Higher Education Press. 134-137 (in Chinese)

刘光钊. 2005. 水体富营养化及其藻害[M]. 北京: 中国环境科学出版社. 37-41, 136-140

Liu G Z. 2005. Toxic Cyanobacteria in Water [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 37-41, 136-140 (in Chinese)

陆源, 文建凡, 吕天雯. 2001. 滇池铜绿微囊藻(*M. aeruginosa* Kützing)的分离培养与总DNA提取的改进[J]. 湖泊科学, 13(3): 285-288

Lu Y, Wen J F, Lü T W. 2001. Isolation, pure cultivation and total DNA extraction of *Microcystis aeruginosa* Kützing in Dianchi lake [J]. Journal of Lake Sciences, 13(3): 285-288 (in Chinese)

Raman R K. 1985. Controlling algae in water supply impoundments [J]. Journal of the American Water Works Association, 8: 41-43

Raman R K. 1988. Integration of laboratory and field monitoring of copper sulphate applications to water supply impoundments [A]. In: Advances in Water Analysis and Treatment [C]. St. Louis, Missouri: Proceedings of AWWA Technology Conference. 203-224

王蕾, 石利利, 蔡道基. 2011. 蓝藻水华优势藻高效防控制剂筛选研究[J]. 生态与农村环境学报, 27(1): 60-64

Wang L, Shi L L, Cai D J. 2011. Screening of copper-algaecide to suppress dominant algae of cyanobacteria algal bloom [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 27(1): 60-64 (in Chinese)

王莉, 唐丽雅, 魏晨曦, 等. 2009. 邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯对斜生栅藻的生态毒性作用[J]. 生态毒理学学报, 3(4): 452-456

Wang L, Tang L Y, Wei C X, et al. 2009. Ecological toxicity of di-(2-ethylhexyl) phthalate on *Scenedesmus obliquus* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 3(4): 452-456 (in Chinese)

邢丽贞, 陈华东, 李飞. 2001. 景观水体中藻类水华的成因及药剂控制分析[J]. 山东建筑大学学报, 21(6): 553-556, 561

- Xing L Z , Chen H D , Li F. 2001. Algae bloom-forming and algicide control in landscape water systems [J]. *Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering* , 21 (6) : 553-556 , 561 (in Chinese)
- 袁林江,张伟,孔海霞. 2009. 富营养景观水体中藻类和磷的去除试验[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)* , 41 (2) : 236-240
- Yuan L J , Zhang W , Kong H X. 2009. Removal test of phosphate landscape water and algae from eutrophic by coagulation [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology* , 41 (2) : 236-240 (in Chinese)
- 赵玉华,刘畅,薛飞,等. 2007. 影响分光光度法检测藻类叶绿素 a 的因素[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)* , 23 (3) : 482-484
- Zhao Y H , Liu C , Xue F , *et al.* 2007. Test of factors influencing chlorophyll — a in water algal by spectrophotometry [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science* , 23 (3) : 482-484 (in Chinese)
- 周律,邢丽贞,陈华东,等. 2009. 利用络合铜控制水华优势藻的试验研究[J]. *环境科学与技术* , 32 (8) : 13-15
- Zhou L , Xing L Z , Chen H D , *et al.* 2009. Experimental Study on suppressing dominant algae of water bloom by chelated copper [J]. *Environmental Science and Technology* , 32 (8) : 13-15 (in Chinese)