

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.08.2015011407

王玲, 郑明刚, 赵燕燕, 等. 三(2,3-二溴丙基)异氰脲酸酯对微拟球藻的毒性效应[J]. 环境化学, 2015, 34(8): 1433-1438  
WANG Ling, ZHENG Minggang, ZHAO Yanyan, et al. Toxic effect of Tris-(2,3-Dibromopropyl) Isocyanurate on *Nannochloropsis* sp. [J].  
Environmental Chemistry, 2015, 34(8): 1433-1438

三(2,3-二溴丙基)异氰脲酸酯对微拟球藻的毒性效应\*

王玲<sup>1\*\*</sup> 郑明刚<sup>2</sup> 赵燕燕<sup>1</sup> 王春<sup>1</sup> 李妍<sup>1</sup> 楼迎华<sup>1</sup> 石磊<sup>1</sup>

(1. 青岛大学化学化工与环境学院, 青岛, 266071; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛, 266061)

**摘 要** 通过研究新型杂环类溴代阻燃剂三(2,3-二溴丙基)异氰脲酸酯(TBC)对微拟球藻的毒理效应,探索TBC对海洋初级生产力的作用机制.实验选用微拟球藻(*Nannochloropsis* sp.)为供试藻种,以微藻急性毒性、生长率、抑制率、叶绿素浓度和光合活性的变化为参数,研究微拟球藻对不同浓度的TBC产生的毒理效应.结果表明,藻细胞密度随TBC浓度增加而明显下降,且呈现较好的剂量-效应关系;微拟球藻叶绿素浓度与TBC浓度存在剂量效应关系,即微拟球藻叶绿素浓度随TBC浓度升高呈现下降的趋势,TBC微拟球藻光合色素含量的增加有抑制作用.本研究为TBC对海洋生态毒理学的研究提供了一些新的科学依据.

**关键词** 三(2,3-二溴丙基)异氰脲酸酯, 微拟球藻, 生长抑制, 叶绿素浓度, 光合活性.

Toxic effect of Tris-(2,3-Dibromopropyl) Isocyanurate  
on *Nannochloropsis* sp.

WANG Ling<sup>1\*\*</sup> ZHENG Minggang<sup>2</sup> ZHAO Yanyan<sup>1</sup> WANG Chun<sup>1</sup>  
LI Yan<sup>1</sup> LOU Yinghua<sup>1</sup> SHI Lei<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering and Environment, Qingdao University, Qingdao, 266071, China;  
2. State Oceanic Administration, First Institute of Oceanography, Qingdao, 266061, China)

**Abstract:** In this research, toxicity of tris-(2,3-dibromopropyl) Isocyanurate (TBC) on marine primary productivity (*Nannochloropsis* sp.) had been studied. In order to study the toxicological effect of different concentrations of TBC on *Nannochloropsis* sp., growth rate, inhibition rate, chlorophyll concentration and photosynthetic activity were chosen as experimental parameters. The results demonstrated that algal cell density decreased with increasing concentration of TBC, and showed a dose-effect relationship. The chlorophyll concentration and photosynthetic activity were inhibited obviously by TBC. This study could provide some new scientific data for the research of TBC on the marine ecological toxicology.

**Keywords:** Tris-(2,3-dibromopropyl) Isocyanurate, *Nannochloropsis* sp., growth inhibition, chlorophyll concentration, photosynthetic activity

三(2,3-二溴丙基)异氰脲酸酯(TBC)是一种杂环六溴化合物,化学性质稳定,阻燃性能高,挥发性低,相容性好,具有高辛醇/水分配系数( $\lg K_{ow} = 7.37$ )和高辛醇/空气分配系数( $\lg K_{oa} = 23.68$ )<sup>[1]</sup>.作为新型添加型阻燃剂,TBC很容易在材料的使用和废弃过程中析出,对环境造成污染,除此之外TBC容易在沉积物中积累,生物富集性很高.有研究表明,TBC在短时间内就能发散到环境中<sup>[2]</sup>.目前为止,TBC的世界总产量还不清楚,但是从中国的TBC使用量和输出量可以看出,TBC的产量和对环境的潜在危

2015年1月14日收稿.

\* 国家自然科学基金((21307063); 国家海洋局重点实验室开放基金(MBSMAT-2011-04).

\*\* 通讯联系人, Tel: 18669888558; E-mail: qd\_wling@sohu.com

害不容忽视<sup>[1,3]</sup>.研究表明,TBC 可显著抑制 17β-雌二醇引起的斑马鱼肥满度指数上升,并能改善 17β-雌二醇暴露导致的斑马鱼精子细胞比例降低和性腺发育迟缓<sup>[4]</sup>.黎娟等对斑马鱼幼体进行 TBC 暴露实验,研究结果表明 TBC 能够影响斑马鱼的孵化率,导致斑马鱼幼体的鱼鳔发育缺陷,降低鱼鳔面积<sup>[5]</sup>.

藻类是水体中有机物的制造者,对整个水生生态系统的运转提供关键的物质能量基础.在制造有机物的同时,发挥着清洁者的作用.除此之外,藻类在水生生态系统中还发挥传递各种生态信息的作用.利用藻类吸收、富积和降解作用,可有效的去除污水中的重金属和营养盐,还能降解多种有机毒物.微藻作为水生环境中的初级生产者,其种类的多样性和生产量直接影响水生生态系统的结构和功能,对水生环境的平衡和稳定具有极其重要的作用.而且微藻个体小,繁殖快,易于实验室培养,对有毒物质敏感,在短时间内可观察到有毒物质对藻类世代和藻类种群的影响<sup>[6]</sup>.因而近年来人们在水体安全评价,环境毒物检测等各方面越来越多的使用藻类作为生物指示物<sup>[7-10]</sup>.微拟球藻是一种真核单细胞绿色微藻,归属于褐藻门,大眼藻纲,单珠藻科.其繁殖速度较快,耐受性很好,易于培养,因此是一种理想的化学物质毒性测试生物.

本文选取微拟球藻为受试生物,通过测定 TBC 暴露对微拟球藻的生长率与抑制率及叶绿素浓度和光合活性的变化,研究了 TBC 对微拟球藻的毒性效应.

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

仪器:酶标仪(INFINITE 200,帝肯(奥地利)贸易有限公司),叶绿素荧光仪(PHYTO-PAM,德国 WALZ 公司),高压灭菌锅(HVE-50,日本株式会社平山制作所),智能光照培养箱(GXZ-300B,宁波东南仪器有限公司).

试剂:(2,3-二溴丙基)异氰脲酸酯(分析纯),购自美国 Sigma 公司.二甲基亚砜(DMSO),购自德国默克公司.

### 1.2 实验材料

微拟球藻由国家海洋局第一海洋研究所藻种室提供.培养液选用 f/2 营养盐配方<sup>[11]</sup>.培养选用 1000 mL三角烧瓶.培养条件为:温度(24±1)℃(空调调温),白光光强为 4000 lx,光暗周期比 L:D 为 14:10.培养所用海水取自青岛鲁迅公园的天然海水,经 0.45 μm 孔径的玻璃纤维膜过滤,煮沸消毒.

### 1.3 实验设计

#### 1.3.1 藻类生长量的测定

将酶标仪检测与血球计数法相结合,建立微拟球藻藻液光密度与细胞密度之间的线性关系( $R^2>0.99$ )(图 1).实验选用 1000 mL 三角烧瓶,设置 3 个平行样,每个三角烧瓶内盛 600 mL 备用海水,放入高压灭菌锅灭菌.藻液初始接种浓度为  $2.0\times10^6$  ind·mL<sup>-1</sup>,当微拟球藻达到指数生长期时,取样检测.酶标仪检测波长为 600 nm(OD<sub>600 nm</sub>),用血球计数法统计同一样品的细胞数,建立藻液光密度与细胞密度之间的线性关系.当平行样间的偏差小于 10%时,取 3 个平行样的平均值.

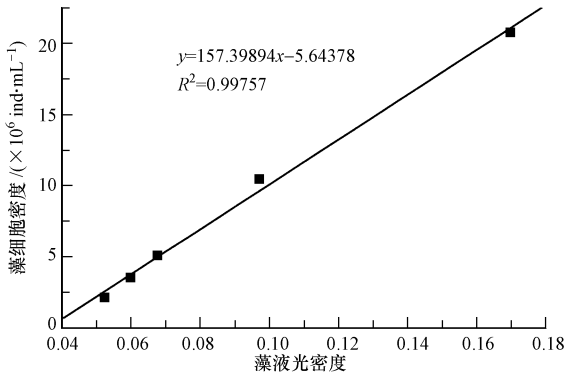


图 1 微拟球藻光密度与细胞浓度相关性

Fig.1 The liner relationship of the optical density and cell concentration of *Nannochloropsis* sp.

藻液光密度与藻细胞密度之间的线性函数为  $y = 157.39894x - 5.64387$ , 相关系数为  $R^2 = 0.99757$ . 因此, 在后续实验中, 只需要按照取样时段(0、24、48、72、96 h)检测藻液的光密度值, 便可计算出相应时段的藻细胞密度, 从而观察藻细胞生长量的变化.

1.3.2 溶剂不可见效应浓度 (NOEC) 的测定

为准确表示 TBC 对微拟球藻的毒性强弱, 需要扣除 DMSO 对微拟球藻的影响. 因此实验首先要确认 DMSO 的 NOEC 值, 以后每次实验中都要使用这个浓度, 以确保 DMSO 不会对实验结果造成影响<sup>[12]</sup>. 求出各处理浓度藻液细胞密度和对照样品中藻类细胞密度之间的关系, 就能说明 DMSO 对藻液的影响程度. 以 72 h 藻液细胞密度为指标, 选出一个比较接近对照生物量对应的 DMSO 浓度作为实验中的 NOEC 浓度.

1.3.3 TBC 对微拟球藻生长抑制实验

根据预实验结果, TBC 控制组浓度设置为 10、100、1000 ng · mL<sup>-1</sup>, 设置一个空白对照组 (0 ng · mL<sup>-1</sup>), 每组 3 个平行. 通过检测微拟球藻接种后每 24 h 藻液光密度值, 根据光密度和藻细胞密度的相关性, 得出微拟球藻细胞密度的变化, 从而求出微拟球藻的生长率, 抑制率.

微拟球藻的生长率是指单位时间内细胞增长的量, 主要通过初始细胞数的比较来测算藻细胞生长情况. TBC 暴露后微拟球藻的生长率可用下式计算:

$$\mu = (\ln N_t - \ln N_0) / t$$

式中,  $\mu$  为藻类平均生长率;  $t$  为藻类培养时间, 单位为 d;  $N$  为藻类细胞生长量,  $N_0$  为藻的初始细胞数,  $N_t$  为培养时间  $t$  后的细胞数.

TBC 对微拟球藻的生长抑制率可通过下式计算:

$$I = 1 - \mu_{\text{样}} / \mu_{\text{对}}$$

式中,  $I$  为生长抑制率,  $\mu$  为生长率.  $\mu_{\text{样}}$  表示经过 TBC 暴露后样品中的藻细胞生长率, 同理  $\mu_{\text{对}}$  表示对照组中藻细胞生长率.

1.3.4 微拟球藻叶绿素浓度测定

叶绿素是一类与光合作用有关的最重要的色素, 具有吸收、传递和转换光能的作用, 是光合作用必不可少的光合色素. 光合作用通过叶绿素从光中吸收能量, 将二氧化碳和水转变为碳水化合物和氧气. 利用叶绿素荧光仪 (PAM) 检测藻液的叶绿素浓度. 取样时间段为接种后 0、24、48、72、96 h. 通过检测微拟球藻叶绿素浓度变化, 分析 TBC 暴露处理对微拟球藻叶绿素浓度变化的影响.

1.3.5 微拟球藻光合活性测定

利用叶绿素荧光仪 (PAM) 检测藻液光合活性. 取样时段为接种后 0、24、48、72、96 h. 研究 TBC 暴露处理后, 微拟球藻光合活性的变化情况.

2 结果与讨论

2.1 溶剂效应的测定

设置 6 个 DMSO 浓度 0、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%, 每个浓度设置 3 个平行样, 重复实验 1 次. 微拟球藻初始接种密度为  $2.0 \times 10^6$  ind · mL<sup>-1</sup>. 测定 72 h 后控制组细胞密度和对照组细胞密度之间的关系得到结果如图 2 所示.

DMSO 对实验藻种的影响随着 DMSO 浓度的增加而改变, 首先表现出对藻类生长的促进作用, 当 DMSO 浓度达到 0.4% 左右的时候藻类生长的测试指标细胞密度达到最大值. 从这个浓度开始, 藻类随着 DMSO 的浓度增大生长受到抑制, 当达到 0.63% 时, 藻类的细胞数量达到对照组水平左右. 实验结果确定微拟球藻 72 h NOEC 数值为 0.63%. 确定接种时所有微拟球藻溶液中 DMSO 含量均为 0.63%.

2.2 TBC 对微拟球藻生长抑制影响

2.2.1 微拟球藻的生长曲线

实验选用 1000 mL 三角烧瓶, 内盛 600 mL 备用海水, 放入高压灭菌锅灭菌, 设置 3 个平行. 微拟球藻初始接种密度为  $3.0 \times 10^6$  ind · mL<sup>-1</sup>. 每隔 24 h 取样, 测定微拟球藻的正常生长曲线, 如图 3 所示. 由图 3

可知,初始接种后,微拟球藻经历 2 d 的适应期,在此阶段微拟球藻的数量几乎没有变化;经过适应期后,藻细胞生长逐渐进入指数生长期,此时期的藻细胞生长最旺盛,所以选择指数生长期(接种后 3 d)为 TBC 暴露时段;接种后 7 d 左右,藻细胞达到一定数量,其生长不再增加,便进入平台期,此时期藻细胞增长缓慢甚至停止增长,最后进入衰亡期.

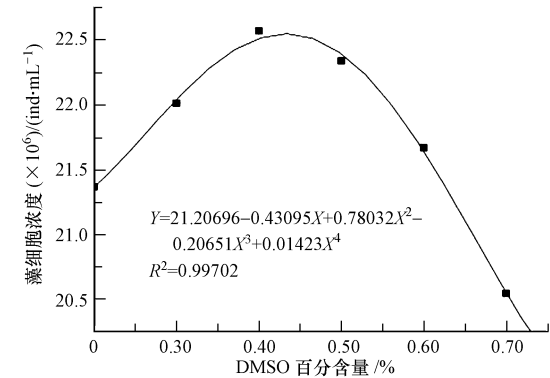


图 2 二甲亚砜(DMSO)的不可见效应浓度(NOEC)  
Fig.2 The no obvious effect concentration of DMSO

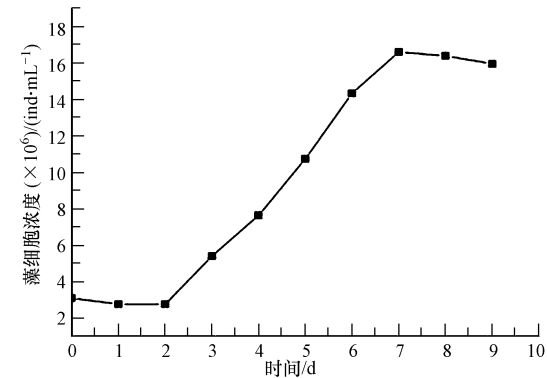


图 3 微拟球藻正常条件下的生长曲线  
Fig.3 The growth curve of *Nannochloropsis* sp. under normal conditions

2.2.2 TBC 对微拟球藻生长影响

分别取 60 mL 指数期生长的微拟球藻母液于 4 个锥形瓶中,均加入 DMSO(不可见效应浓度为 0.63%),其中 1 瓶为对照组,另外 3 组为实验组,分别加入 3 个浓度(10、100、1000 ng·mL<sup>-1</sup>)TBC 对其进行暴露.依此方法分别设置 3 个平行.用显微镜每天对微拟球藻的密度进行观察统计藻细胞密度.不同浓度 TBC 对微拟球藻的生长影响情况见图 4.结果表明,与对照组(0 ng·mL<sup>-1</sup>)相比,不同浓度 TBC(10、100、1000 ng·mL<sup>-1</sup>)对微拟球藻的生长均产生不同影响,且随着 TBC 浓度的增加,影响程度增大.与对照组相比,微拟球藻在不同浓度 TBC(10、100、1000 ng·mL<sup>-1</sup>)下的增长都缓慢,且随着浓度的升高,生长越缓慢.

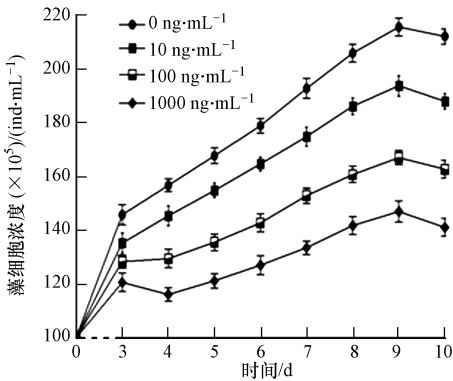


图 4 不同浓度 TBC 暴露对微拟球藻生长的影响  
Fig.4 Effects of different TBC concentrations on the growth of *Nannochloropsis* sp.

根据微生物或植物对环境胁迫的应激反应可知,微生物或者植物在生长环境突然变化时,由于自我保护的本能反应,会通过减少细胞代谢而降低生长能力.因此,在暴露处理的前两天抑制率明显增高.待微生物适应环境后,抑制率恢复正常,随着微拟球藻的不断生长,抑制率逐渐增大,到第 6 天时抑制率达到正常反应后的最大值,第 7 天开始降低.

TBC 暴露对微拟球藻生长率及抑制率影响情况见表 1.从表 1 可知,对照组(0 ng·mL<sup>-1</sup>)微拟球藻细胞数量随时间增长不断增加,但增加幅度呈现出降低趋势,即微拟球藻的生长率随着时间呈现逐渐降低趋势.总体上看,3 个控制组(10、100、1000 ng·mL<sup>-1</sup>)的生长率均低于对照组,即 TBC 对微拟球藻的生长有影响,且随着 TBC 浓度增加影响加剧.其中,低浓度控制组(10 ng·mL<sup>-1</sup>)相比于对照组的生长率变化最小,表现出类似对照组的变化趋势.中浓度控制组(100 ng·mL<sup>-1</sup>)与高浓度控制组(1000 ng·mL<sup>-1</sup>)生



长率均明显低于对照组.暴露后第 2 天,中浓度控制(100 ng·mL<sup>-1</sup>)组生长率明显降低,高浓度控制组(1000 ng·mL<sup>-1</sup>)呈现不生长状态.三个控制组抑制率均高于对照组,且随着 TBC 浓度增加,抑制率呈现增加趋势.低浓度控制组(10 ng·mL<sup>-1</sup>)在暴露后第 1 天,其抑制率最大.中浓度控制组(100 ng·mL<sup>-1</sup>)和高浓度控制组(1000 ng·mL<sup>-1</sup>)抑制率在暴露后第 2 天达到最大值,此现象与微拟球藻生长曲线规律一致.这可能与微拟球藻生长到指数生长期规律有关.总体来看,TBC 对微拟球藻的抑制率随着 TBC 的浓度增加而增加.

表 1 TBC 暴露后微拟球藻的生长率及抑制率  
Table 1 The growth rate and inhibition rate of *Nannochloropsis* sp. after TBC exposure

| 浓度/<br>(ng·mL <sup>-1</sup> ) | 生长率/% |     |     |     |     |     |     |     | 抑制率/% |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                               | 1 d   | 2 d | 3 d | 4 d | 5 d | 6 d | 7 d | 8 d | 1 d   | 2 d | 3 d | 4 d | 5 d | 6 d | 7 d | 8 d |
| 0                             | 37.4  | 7.2 | 6.8 | 6.5 | 6.1 | 5.7 | 3.0 | —   | —     | —   | —   | —   | —   | —   | —   | —   |
| 10                            | 30.1  | 7.2 | 6.6 | 5.9 | 5.3 | 4.7 | 2.7 | —   | 20    | 0   | 3.0 | 9.0 | 13  | 18  | 10  | —   |
| 100                           | 24.8  | 0.9 | 5.3 | 5.1 | 4.5 | 3.8 | 2.4 | —   | 34    | 87  | 22  | 22  | 26  | 33  | 20  | —   |
| 1000                          | 18.7  | —   | 5.1 | 4.9 | 4.4 | 3.4 | 2.2 | —   | 50    | 100 | 25  | 25  | 28  | 40  | 27  | —   |

2.2.3 TBC 暴露对微拟球藻叶绿素浓度变化的影响

近年来发现绿色植物在逆境(盐害、干旱、冻害、污染等)条件下,叶绿体内会产生过量的活性氧,这些活性氧能与体内许多物质起作用而引起叶绿体的伤害.有研究表明,不同植物受到环境胁迫时,反应光合作用强度的叶绿素、胡萝卜素等色素发生降解,浓度显著降低<sup>[13-14]</sup>.本文在前人研究的基础上,以微拟球藻为材料,通过测定微拟球藻叶绿素浓度的变化,研究 TBC 暴露处理后微拟球藻叶绿素浓度的变化情况.实验结果如图 5 所示.由图 5 可知,对照组(0 ng·mL<sup>-1</sup>)的叶绿素浓度均高于其他 3 个控制组.3 个控制组的叶绿素浓度随着 TBC 浓度的增加而降低,其原因与植物在受到胁迫时,光合速率会降低有关.从微拟球藻的整个生长过程来看,从接种后第 48 h 开始,叶绿素浓度呈现总体上升的趋势.叶绿素浓度可以反映植物的光合作用能力.叶绿素浓度越高,说明植物的光合作用能力越强.TBC 暴露会导致微拟球藻叶绿素浓度降低,且 TBC 浓度越高,叶绿素浓度降低越明显.每个时间段内,与对照组(0 ng·mL<sup>-1</sup>)相比,低浓度控制组(10 ng·mL<sup>-1</sup>)中微拟球藻叶绿素浓度变化最小,高浓度控制组(1000 ng·mL<sup>-1</sup>)的叶绿素浓度变化最大.由于在第 72 h 叶绿素的浓度相对于第 48 h 呈现出轻微的下调趋势,但是与对照组相比其增长的趋势还是比较明显.因此,TBC 暴露处理能够引起微拟球藻叶绿素浓度变化,且微拟球藻叶绿素浓度与 TBC 浓度表现出剂量效应关系.

2.2.4 微拟球藻光活性的测定

光合活性即最大光化学量子产量,反映 PS II 反应中心内光能转换效率或潜在的光能转化效率.有研究表明,植物受到温度、光、重金属、有毒物质等胁迫时,植物的光合活性会显著降低<sup>[15-17]</sup>.TBC 对微拟球藻光活性的影响情况如图 6 所示.

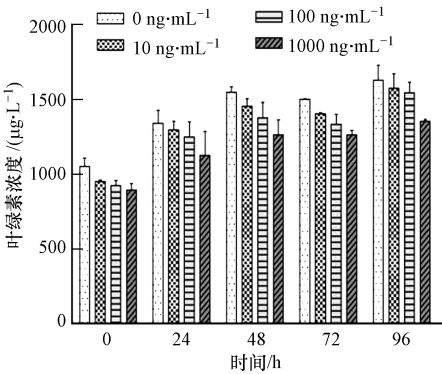


图 5 TBC 对微拟球藻叶绿素浓度的影响  
Fig.5 Effect of TBC on the chlorophyll concentration of *Nannochloropsis* sp.

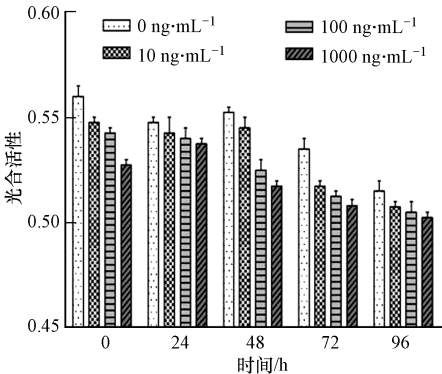


图 6 TBC 对微拟球藻光活性的影响  
Fig.6 Effect of TBC on the photosynthetic activity of *Nannochloropsis* sp.

由图 6 可知,每个时间段 3 个控制组 ( $10$ 、 $100$ 、 $1000\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) 的光合活性均低于对照组 ( $0\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),低浓度控制组 ( $10\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) 中 TBC 暴露对微拟球藻光合活性影响最小,高浓度控制组 ( $1000\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) 中 TBC 暴露对微拟球藻光合活性影响最大.由此表明,TBC 暴露处理后,微拟球藻光合活性在整体范围内呈现降低的趋势.

### 3 结论

选用 TBC 对微拟球藻进行暴露实验,通过测定微拟球藻生长曲线、生长率与抑制率,研究 TBC 对微拟球藻生长情况的影响,从而探索 TBC 对微拟球藻的毒性效应.实验结果表明,经过 TBC 暴露处理后 (1—8 d),微拟球藻的生长情况均受到影响.与对照组 ( $0\text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) 相比,TBC 浓度越大,微拟球藻生长率越低.高浓度的 TBC 对微拟球藻的抑制率相比于对照组要高很多.综上所述,TBC 对微拟球藻生长能够产生毒性效应,明显抑制微拟球藻生长,影响微拟球藻生物量变化.

### 参 考 文 献

- [1] Ruan T, Wang Y W, Wang C, *et al.* Identification and evaluation of a novel heterocyclic brominated flame retardant tris (2,3-dibromopropyl) isocyanurate in environmental matrices near a manufacturing plant in southern China[J]. Environmental science & technology. 2009, 43(9): 3080-3086
- [2] Wang T, Han S L, Ruan T. Spatial distribution and inter-year variation of hexabromocyclododecane (HBCD) and tris-(2,3-dibromopropyl) isocyanurate (TBC) in farm soils at a peri-urban region[J]. Chemosphere. 2013, 90(2): 182-187
- [3] 熊孝勇. 溴系阻燃剂 TBC, LBC 在阻燃电缆料中的应用[J]. 煤矿机电. 1995, (4): 8-9
- [4] 张续,黎娟,刘雅思,等. 三-(2,3-二溴丙基)异氰脲酸酯和 17 $\beta$ -雌二醇复合暴露对雄性斑马鱼的毒性效应[J]. 环境科学学报. 2012, 32(2): 450-456
- [5] Li J, Liang Y, Zhang X, *et al.* Impaired gas bladder inflation in zebrafish exposed to a novel heterocyclic brominated flame retardant tris (2,3-dibromopropyl) isocyanurate[J]. Environ. Sci. Technol. 2011, 45: 9750-9757
- [6] Slooff W, Canton J H, Hermens J L M. Comparison of the susceptibility of 22 freshwater species to 15 chemical compounds. I.(Sub) acute toxicity tests[J]. Aquatic Toxicology, 1983, 4(2): 113-128
- [7] 仇玉兰,夏昭林. 接触生物标志物及其在危险度评价中的应用[J]. 中国职业医学. 2005, 32(2): 58-60
- [8] Sidharthan M, Young K S, Woul L H, *et al.* TBT toxicity on the marine microalga *Nannochloropsis oculata*[J]. Marine pollution bulletin. 2002, 45(1): 177-180
- [9] Wu X L, Liu R Y, Li H X, *et al.* Effects of triclosan on the growth of *Chlorella* spp.[J]. Marine Science Bulletin. 2009, 28(3): 117-120
- [10] Chen H, Lao Y M, Jiang J G, *et al.* Effects of salinities on the gene expression of a ( $\text{NAD}^+$ )-dependent glycerol-3-phosphate dehydrogenase in *Dunaliella salina*[J]. Science of the Total Environment. 2011, 409(7): 1291-1297
- [11] Guillard R R, Ryther J H. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* hustedt, and *detonula confervacea*(Cleve) gran[J]. Canadian journal of microbiology. 1962, 8(2): 229-239
- [12] 秦文弟. 应用蓝藻监测农药对环境污染的研究[D]. 甘肃: 甘肃农业大学硕士学位论文. 2003
- [13] 程建峰,胡芬红,沈允钢.  $\text{NaHSO}_3$  对盐生杜氏藻生长和光合色素含量的影响[J]. 热带海洋学报. 2010, 29(3): 65-70
- [14] 唐学玺,颜挺进,李永棋,等. 久效磷对扁藻的损伤作用和叶绿素 a 降解与活性氧损伤的相关性[J]. 应用生态学报. 1998, 9(6): 631-634
- [15] 韩博平,韩志国,付翔. 藻类光合作用机理与模型[Z]. 科学出版社. 2001: 6-11
- [16] Dawson S P, Dennison W C. Effects of ultraviolet and photosynthetically active radiation on five seagrass species[J]. Marine Biology. 1996, 125(4): 629-638
- [17] 李鹏民,高辉远,Strasser Reto J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学学报. 2005, 31(6): 559-566