

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 ..... 刁海玲, 赵三平, 周文 (1645)

环境损害评估: 国际制度及对中国的启示 ..... 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 ..... 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 ..... 张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 ..... 刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 ..... 徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 ..... 于婕, 李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 ..... 叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 ..... 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 ..... 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)

温州城市降雨径流中BOD<sub>5</sub>和COD污染特征及其初始冲刷效应 ..... 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 ..... 余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季pCO<sub>2</sub>与浮游植物生物量的关系 ..... 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 ..... 雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 ..... 马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)

纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚 ..... 何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 ..... 马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锬, 周丽华, 谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 ..... 康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 ..... 柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 ..... 金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 ..... 王金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 ..... 张璐璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 ..... 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)

倒置A<sup>2</sup>/O-MBR处理城市污水的中试研究 ..... 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 ..... 袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N<sub>2</sub>O释放特性 ..... 梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 ..... 张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 ..... 陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 ..... 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 ..... 赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 ..... 邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究 ..... 赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 ..... 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 ..... 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 ..... 郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 ..... 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 ..... 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)

海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应 ..... 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)

1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究 ..... 刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)

1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 ..... 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 ..... 张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性 ..... 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 ..... 陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 ..... 石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 ..... 文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 ..... 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 ..... 袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 ..... 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 ..... 钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)

厦门秋季近郊地面CO<sub>2</sub>浓度变化特征研究 ..... 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)

GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b ..... 郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 ..... 方治国, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 ..... 郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 ..... 刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 ..... 刘瑞卿, 王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 ..... 谢元博, 李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)

# 海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应

史荣君<sup>1,2</sup>, 黄洪辉<sup>\*</sup>, 齐占会<sup>1</sup>, 胡维安<sup>1,2</sup>, 田梓杨<sup>1,2</sup>, 戴明<sup>1</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 从深圳大鹏湾南澳赤潮暴发海域的表层沉积物中分离得到 1 株海洋溶藻细菌(编号 N3), 以三角褐指藻(*Phaeodactylum tricorutum*) 和常见赤潮生物锥状斯氏藻(*Scrippsiella trochoidea*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*) 和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*) 为实验藻种, 利用液体感染法研究了该株溶藻细菌的溶藻效应及溶藻方式. 结果表明, 菌株 N3 对中肋骨条藻和三角褐指藻均无溶藻活性, 而菌悬液的体积分数为 2% 和 10% 时分别对锥状斯氏藻和海洋原甲藻有较好的溶藻效果, 但溶藻现象不同. 菌株 N3 可使锥状斯氏藻的细胞变形, 胞内物质分布不均匀并最终死亡; 使海洋原甲藻的藻细胞膨胀变形, 细胞膜内物质聚集于一端, 最终藻细胞破裂死亡. 菌株 N3 对锥状斯氏藻和海洋原甲藻的溶藻方式相同, 均以直接溶藻为主. 菌株 N3 的菌悬液以 2%、1% 和 0.1% 的体积分数接种到锥状斯氏藻藻液中时, 细菌的密度整体上呈下降趋势, 2% 处理组中藻细胞在 120 h 内全部死亡, 而 1% 和 0.1% 处理组藻细胞的生长率略低于对照组. 菌株 N3 的菌悬液以 10%、5% 和 1% 的体积分数接种到海洋原甲藻藻液中时, 细菌的密度呈下降趋势, 10% 和 5% 处理组中藻细胞至 120 h 时死亡率分别为 78% 和 70%, 而 1% 处理组的藻细胞与对照组无显著差异. 电镜观察、生理生化鉴定及 16S rRNA 鉴定结果表明, 菌株 N3 为芽胞杆菌属(*Bacillus* sp.).

**关键词:** 溶藻细菌; 锥状斯氏藻; 海洋原甲藻; 溶藻效应; 大鹏湾

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1922-08

## Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China

SHI Rong-jun<sup>1,2</sup>, HUANG Hong-hui<sup>1</sup>, QI Zhan-hui<sup>1</sup>, HU Wei-an<sup>1,2</sup>, TIAN Zi-yang<sup>1,2</sup>, DAI Ming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Development and Utilization, Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Marine Fishery Ecology Environment of Guangdong Province, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. College of Marine Science of Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A marine algicidal bacterium N3 was isolated from a HABs area in Mirs Bay, a subtropical bay, in southern China. Algicidal activity and algicidal mode against *Phaeodactylum tricorutum*, *Scrippsiella trochoidea*, *Prorocentrum micans* and *Skeletonema costatum* were observed by the liquid infection method. The results showed that there were no algicidal activities against *P. tricorutum* and *S. costatum*. However, when the bacterial volume fractions were 2% and 10%, *S. trochoidea* and *P. micans* could be killed, respectively. *S. trochoidea* cells which were exposed to strain N3 became irregular in shape and the cellular components lost their integrity and were decomposed. While, the *P. micans* cells became inflated and the cellular components aggregated, followed by cell lysis. Strain N3 killed *S. trochoidea* and *P. micans* directly, and the algicidal activities of the bacterial strain N3 was concentration-dependent. To *S. trochoidea*, 2% (V/V) of bacteria in algae showed the strongest algicidal activity, all of the *S. trochoidea* cells were killed within 120 h. But the growth rates of cells, in the 1% and 0.1% treatment groups, were only slightly lower than that in the control group. In all treatment groups, the densities of strain N3 were in declining trends. While, to *P. micans*, 10% and 5% of bacteria in algae showed strong algicidal activities, 78% and 70% of the *S. trochoidea* were killed within 120 h, respectively. However, the number of *S. trochoidea* after exposure to 1% of bacterial cultures still increased up to 5 incubation days. And in the three treatment groups, the densities of strain N3 experienced a decrease process. The isolated strain N3 was identified as *Bacillus* sp. by morphological observation, physiological and biochemical characterization, and homology comparisons based on 16S rRNA sequences.

**Key words:** algicidal bacteria; *Scrippsiella trochoidea*; *Prorocentrum micans*; algicidal activity; Mirs Bay

随着全球水体富营养化的加剧, 赤潮问题已经成为全球性的环境问题之一, 对沿海造成了严重的生态、资源、环境问题和重大的经济损失<sup>[1]</sup>. 锥状斯氏藻(*Scrippsiella trochoidea*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*) 和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*) 作为世界性赤潮藻种, 广泛分布于近海及

收稿日期: 2012-08-24; 修订日期: 2012-11-14

基金项目: 广东省渔业生态环境重点实验室开放基金项目(LFE-2011-19); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(中国水产科学研究院南海水产研究所)项目(2007ZD07, 2012TS13); 广东省科技计划项目(2006A36502003, 2006B60202026); “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD13B02)

作者简介: 史荣君(1985~), 女, 硕士, 主要研究方向为海洋环境微生物, E-mail: shirongjun@scsfri. ac. cn

\* 通讯联系人, E-mail: huanghh@scsfri. ac. cn

河口,是我国近岸水域诱发赤潮的主要种类<sup>[2,3]</sup>,而三角褐指藻(*Phaeodactylum tricornutum*)也在海口和青岛等地引发过赤潮<sup>[4,5]</sup>。

与传统的物理和化学赤潮治理方法相比,生物方法作为一种全新的治理赤潮的方法,具有安全可靠、高效快速、环境污染少等优点<sup>[6,7]</sup>,已逐步引起人们的关注。目前,生物治理方法中的溶藻生物包括细菌、病毒、原生动物及真菌<sup>[3]</sup>,其中,以溶藻细菌研究最受瞩目。研究表明,赤潮暴发期间更易分离出具有溶藻活性的细菌<sup>[8,9]</sup>。因此,本实验从深圳大鹏湾锥状斯氏藻赤潮暴发海区分离筛选了 1 株溶藻细菌,并就其对锥状斯氏藻和海洋原甲藻的溶藻效应进行了研究,旨在探讨赤潮治理的有效方法,为海洋细菌控藻技术的开发提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 藻种来源及其培养

实验藻种是锥状斯氏藻、海洋原甲藻、中肋骨条藻和三角褐指藻,由暨南大学水生生物研究所提供。藻种经活化后,采用 f/2 培养基<sup>[10,11]</sup>于 23℃(三角褐指藻的培养温度为 18℃),11 h:13 h 光暗循环比的光照培养箱中培养。

### 1.2 海洋细菌样品的采集与前处理

2010 年 7 月 29 日,深圳大鹏湾发生锥状斯氏藻赤潮,采集表层海水及沉积物样品。取 100 mL 海水用 0.7 μm 硝酸纤维素膜过滤,4℃ 保存备用。取 20 g 表层沉积物样品于灭菌的三角锥瓶中,加入 180 mL 无菌海水,振荡 20 min,充分混匀后用 0.7 μm 硝酸纤维素膜过滤,4℃ 保存备用。

### 1.3 海洋细菌的分离和纯化

将低温保存的样品分别梯度稀释后涂布平板,细菌的培养基采用 2216E 琼脂培养基,(28 ± 1)℃ 恒温培养 48 h,挑取特征差异明显的菌落划线,(28 ± 1)℃ 恒温培养 48 h。重复以上操作两次,得到纯培养的细菌。将纯化的菌株转接到细菌斜面培养基上,(28 ± 1)℃ 恒温培养 48 h 后于 4℃ 保存。

### 1.4 无菌藻液的制备

取 1 mL 处于对数生长期的藻液接种于 20 mL 抗生素-藻类液体混合培养基<sup>[12]</sup>,浸泡 4 ~ 8 h 后用藻类液体培养基稀释 500 倍,置于光照培养箱中培养。

### 1.5 溶藻细菌的筛选

从细菌斜面培养基上挑取 1 环菌落在细菌平板培养基上划线,(28 ± 1)℃ 恒温培养 48 h 后用

4 mL 无菌海水洗脱制成细菌悬液。将以 2% 和 10% 的体积分数混合的细菌悬液加入装有处于对数生长期的无菌藻液(藻细胞浓度约  $1.0 \times 10^4$  cells·mL<sup>-1</sup>)的 48 孔细胞培养板的板孔中(每个板孔容积约 1.2 mL),每个筛选实验组设 2 个平行实验板孔(其中对照组以无菌海水代替细菌悬液)。用石蜡密封筛选实验的细胞培养板,置于光照培养箱中培养。每天用倒置显微镜(Olympus IX70,日本)观察板孔中的藻细胞形态变化及其存活情况,连续观察 5 d,当有大量的藻细胞死亡时,则认为该菌株有溶藻作用,确定其为溶藻细菌。

### 1.6 菌株的鉴定

细菌 N3 的菌悬液染色后用透射电镜(Hitachi-7650,日本)观察细菌形态,同时进行生理生化鉴定<sup>[13]</sup>及 16S rRNA 序列分析<sup>[14,15]</sup>,测序结果提交至 GenBank 数据库并采用 BLAST(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/blast>)进行对比分析,以 16S rDNA 序列相似度 ≥97% 作为属水平上的鉴定划分标准<sup>[16]</sup>。

### 1.7 溶藻细菌 N3 的溶藻效应

将菌株 N3 的细菌悬液以 2%、1% 和 0.1% 的体积分数与锥状斯氏藻藻液混合,以 10%、5% 和 1% 的体积分数与海洋原甲藻藻液混合,对照组分别为对应比例的无菌海水与无菌藻液混合,各设 4 个平行,细胞培养板用石蜡密封后置于光照培养箱中培养。每隔 24 h 用血球计数板对藻类生长情况进行藻细胞显微镜(Leica LB30s,德国)观察计数,同时利用平板涂布法对溶藻细菌进行计数。

### 1.8 溶藻方式

取部分菌株 N3 的细菌悬液置于 50 mL 无菌离心管中 12 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 20 min,上清液经 0.22 μm 滤膜过滤后得滤液,部分滤液经 105℃ 加热 5 min,备用。同时,利用涂布平板法检测菌悬液的滤液及加热后的滤液中是否已完全除去菌体。将制备好的溶藻细菌菌悬液、滤液和高温加热后的滤液(对照组为无菌海水)分别以 2% 和 10% 的体积分数接种到锥状斯氏藻和海洋原甲藻藻液中,每个实验组设 3 个平行,用石蜡密封后置于光照培养箱中培养。并分别培养 120 h 和 72 h 后用血球计数板对藻类生长情况进行藻细胞显微镜观察计数。

### 1.9 数据处理

实验中藻细胞数均以平均值 ± 标准误( $X \pm E$ )表示,藻细胞死亡率(%) =  $(1 - \frac{N_t}{N_0}) \times 100$  ( $N_t$ : 培养时间为  $t$  时的藻细胞数,  $N_0$ : 初始藻细胞数)。数据

采用 Statistica 6.0 (Statsoft, Tulsa, OK, USA) 进行分析, 并利用  $t$  检验 ( $P < 0.05$ ) 分析实验组间及其与对照组的差异. 利用 MEGA 4.0<sup>[17]</sup> 绘制细菌 N3 的系统进化树.

## 2 结果与分析

### 2.1 溶藻细菌的分离、纯化及筛选

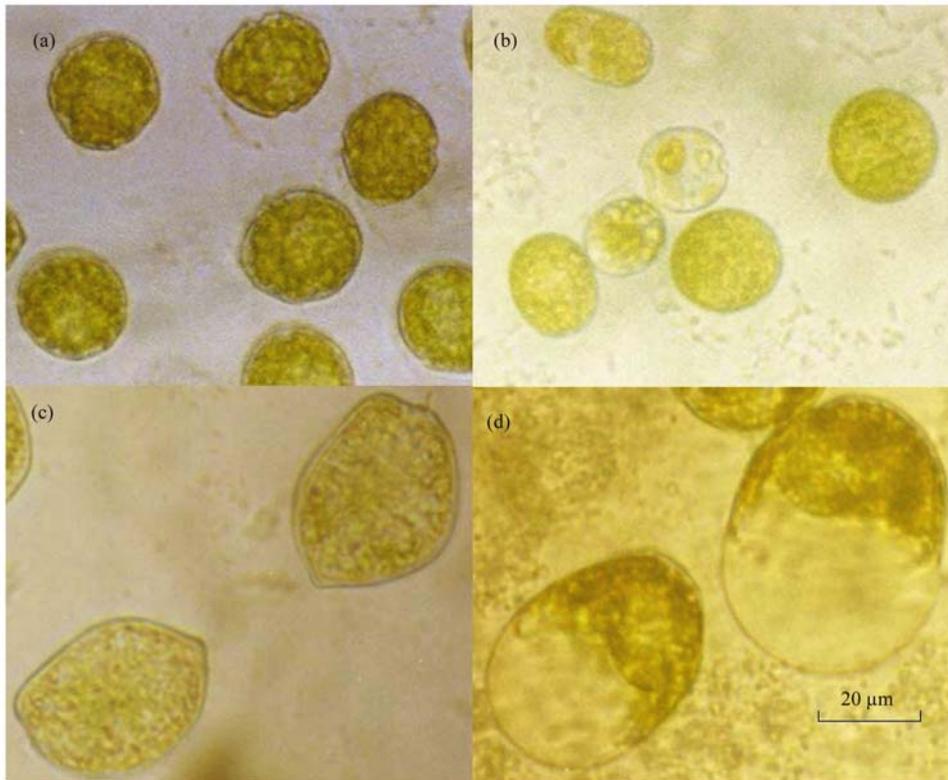
根据菌落形态特征(大小、表面特征、边缘、隆起状况和颜色等)以及藻菌混合培养后藻细胞的死亡情况, 分离筛选出 1 株编号为 N3 的海洋细菌, 其在体积分数为 10% 和 2% 时对中肋骨条藻和三角褐指藻均无溶藻效应, 但在体积分数为 2% 时即对锥

状斯氏藻具有溶藻活性, 而当体积分数升至 10% 时可溶解海洋原甲藻(表 1). 在藻菌混合培养过程中, 菌株 N3 使锥状斯氏藻细胞变形, 细胞膜内物质分布不均匀, 细胞失去运动活性而后死亡. 菌株 N3 使海洋原甲藻的藻细胞先膨胀成球形, 膜内物质聚集于细胞一端, 而后死亡(图 1).

表 1 溶藻细菌 N3 的溶藻范围<sup>1)</sup>

细菌悬液的体积分数/%	锥状斯氏藻	海洋原甲藻	中肋骨条藻	三角褐指藻
10	+	+	-	-
2	+	-	-	-

1) “+”表示有大量藻细胞死亡; “-”表示无藻细胞死亡



(a) 正常锥状斯氏藻细胞; (b) 溶藻细菌 N3 作用下的锥状斯氏藻细胞;  
(c) 正常海洋原甲藻细胞; (d) 溶藻细菌 N3 作用下的海洋原甲藻细胞

图 1 正常及溶藻细菌 N3 作用下的锥状斯氏藻和海洋原甲藻细胞形态

Fig. 1 Morphology of normal cells of *Scripsiella trochoidea* and *Proocentrum micans* and cells under the effects of strain N3 observed by inverted microscope

### 2.2 菌株的鉴定

#### 2.2.1 溶藻细菌形态和生理生化特征

电镜下观察菌株 N3 呈椭圆状, 单个细胞大小为  $(0.7 \sim 0.8) \mu\text{m} \times (2 \sim 3) \mu\text{m}$ , 可产芽孢, 具周生鞭毛(图 2). 溶藻细菌的菌落及生理生化特征如表 2 所示.

#### 2.2.2 16S rRNA 序列分析

溶藻细菌 N3 的 16S rDNA 的序列长度为

1 402 bp. 利用 BLAST 程序将此序列与 GenBank 数据库中的已知序列进行同源性检索, 其系统进化树如图 3 所示, 最近似菌株为 *Bacillus subtilis* IARI-L-69 (相似度 100%, 基因库序列号为 JF343198), 溶藻细菌 N3 隶属于芽胞杆菌属 (*Bacillus* sp.).

### 2.3 菌株 N3 不同初始浓度下的藻菌数量变化

#### 2.3.1 不同初始浓度下菌株 N3 与锥状斯氏藻的数量变化

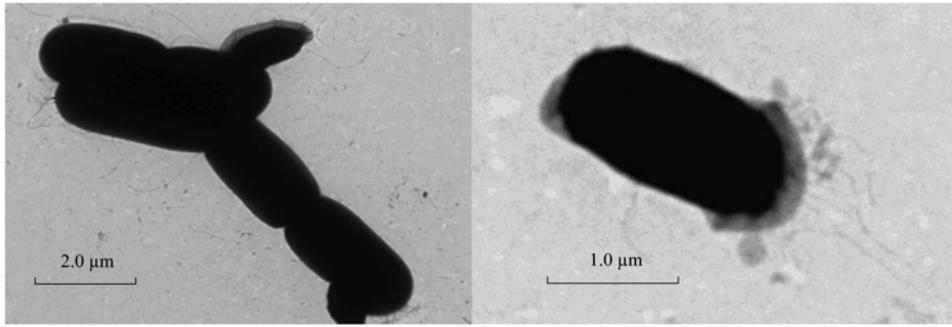


图 2 溶藻细菌 N3 形态特征的透射电镜观察

Fig. 2 Transmission electron micrographs of the algicidal bacterial strain N3

表 2 菌株 N3 的菌落形态及生理生化特征<sup>1)</sup>

Table 2 Colony and physicochemical characteristics of strain N3

鉴定内容	鉴定结果	鉴定内容	鉴定结果
菌落: 颜色	白	最适盐度/%	1
隆起状况	平	兼性好氧或厌氧	+
硬度	适中	产乳酸	-
透明度	不透明	硝酸盐还原	-
边缘状况	光滑	生长 pH	5.0 ~ 8.5
革兰氏染色	+	最适 pH	7.0
运动性	+	氧化酶	-
芽孢形状	椭圆	甲基红试验	+
孢囊膨大	-	葡萄糖氧化发酵实验	+
生长温度/℃	4 ~ 45	接触酶	+
最适温度/℃	30 ~ 37	硫酸盐还原	-
生长盐度/%	0 ~ 7		

1) “+”表示呈阳性; “-”表示呈阴性

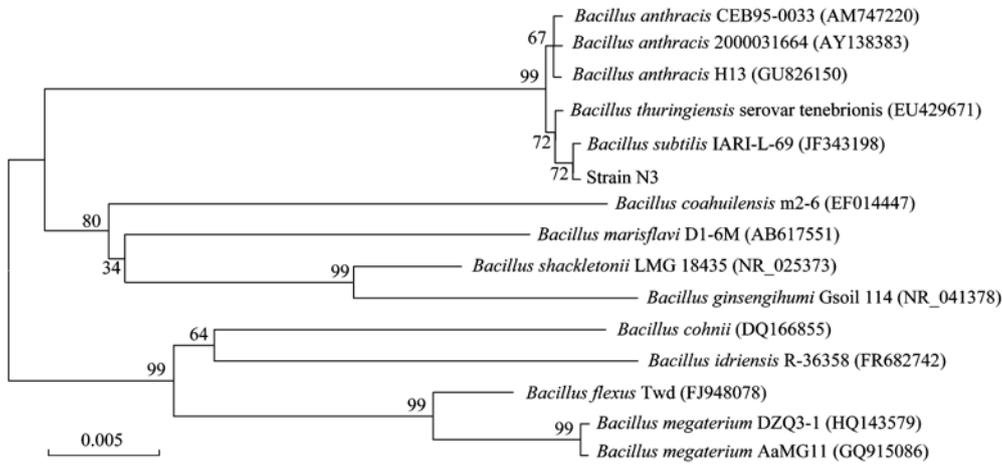


图 3 溶藻细菌 N3 的系统进化树

Fig. 3 Phylogenetic tree of strain N3 based on 16S rRNA gene sequences

CFU·mL<sup>-1</sup>; 处理组 (0.1%) 的细菌密度在前 24 h 内保持不变, 之后明显下降, 120 h 内由 1.3 × 10<sup>6</sup> CFU·mL<sup>-1</sup>降为 1.0 × 10<sup>5</sup> CFU·mL<sup>-1</sup>.

### 2.3.2 不同初始浓度下菌株 N3 与海洋原甲藻的数量变化

各体积分数菌藻混合液 (10%、5% 和 1%) 对

3 个体积分数 (2%、1% 和 0.1%) 的菌藻混合液对照组中, 藻细胞密度均呈稳步上升趋势 (图 4), 120 h 内分别上升至 (2.3 ± 0.1) × 10<sup>5</sup>、2.5 × 10<sup>5</sup> 和 2.7 × 10<sup>5</sup> cells·mL<sup>-1</sup>, 增长了 4.6、5.1 和 5.4 倍.

由图 4 可见, 菌株 N3 处理组 (2%) 的锥状斯氏藻藻细胞密度显著下降, 至 120 h 藻细胞全部溶解死亡; 而处理组 (1% 和 0.1%) 的藻细胞密度均呈上升趋势, 但藻细胞密度的增长显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ). 菌株 N3 处理组 (2% 和 1%) 的细菌密度在前 24 h 迅速下降, 分别由 2.5 × 10<sup>7</sup> CFU·mL<sup>-1</sup> 和 1.3 × 10<sup>7</sup> CFU·mL<sup>-1</sup> 降至 1.1 × 10<sup>6</sup> CFU·mL<sup>-1</sup> 和 1.3 × 10<sup>6</sup> CFU·mL<sup>-1</sup>, 之后略有波动, 至 120 h 时细菌密度分别为 1.5 × 10<sup>6</sup> CFU·mL<sup>-1</sup> 和 3.5 × 10<sup>5</sup>

应的对照组中, 藻细胞密度均呈明显上升趋势 (图 5), 120 h 内分别上升至 (6.9 ± 0.1) × 10<sup>4</sup>、(5.9 ± 0.1) × 10<sup>4</sup> 和 (5.3 ± 0.2) × 10<sup>4</sup> cells·mL<sup>-1</sup>, 增长了 6.3、5.1 和 4.4 倍.

由图 5 可见, 菌株 N3 的 10% 处理组中的藻细胞密度在前 48 h 内缓慢下降, 之后迅速下降至 96 h

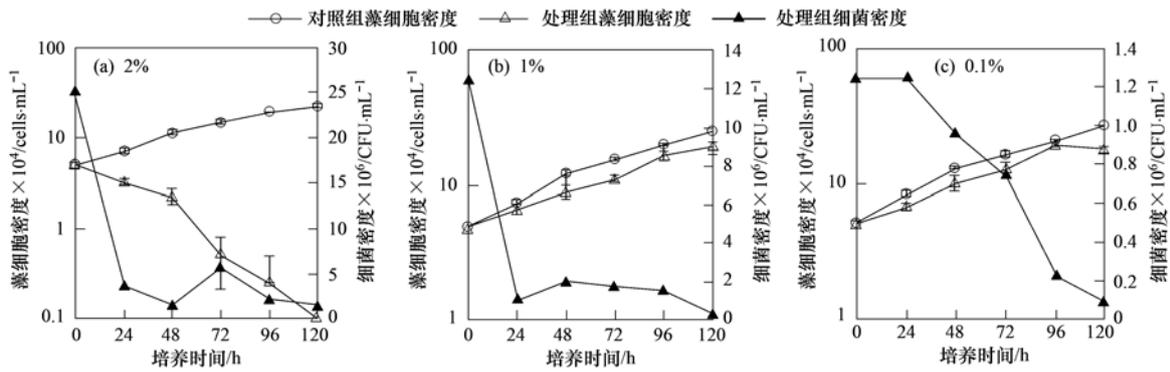


图4 菌株 N3 以 2%、1% 和 0.1% 的体积分数与锥状斯氏藻混合时的藻菌数量变化

Fig. 4 Population dynamics of strain N3 and *Scripsiella trochoidea* in the bacterial volume fraction of 2%, 1% and 0.1%

时死亡率达 81%，到 120 h 时死亡率变为 78%；5% 处理组的藻细胞密度缓慢增加至 48 h 后明显下降，至 72 h 时死亡率为 79%，之后藻细胞密度缓慢上升，至 120 h 时死亡率为 70%；1% 处理组的藻细胞密度呈明显上升趋势，与对照组无显著差异 ( $P > 0.05$ )。菌株 N3 的 10% 和 5% 处理组中的细菌密度在前 24 h 迅速升高，分别由  $4.5 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  和

$2.4 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  升至  $3.5 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $1.5 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，之后分别迅速下降至 48 h 的  $2.8 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $2.5 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  后波动变化，至 120 h 时的细菌密度分别为  $2.5 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $1.3 \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；处理组 (1%) 的细菌密度呈波动变化，在 120 h 内由  $5.0 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$  降为  $1.2 \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

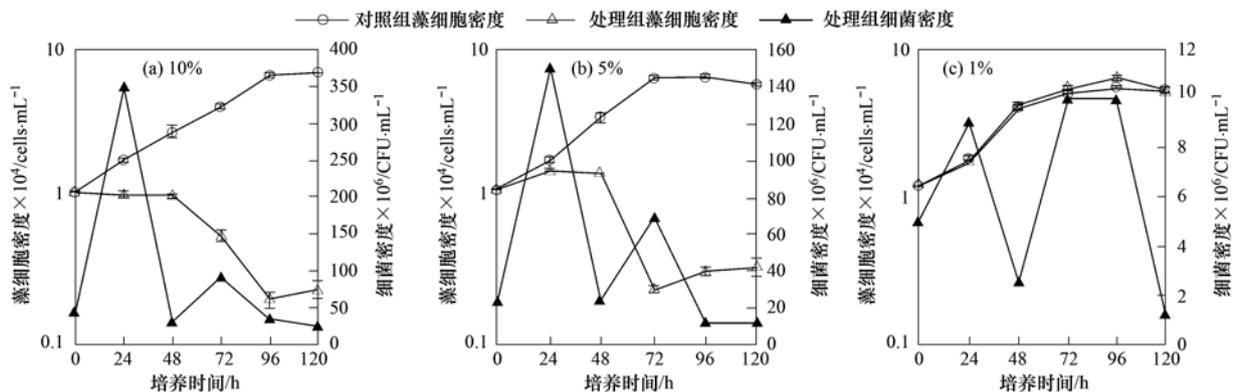


图5 菌株 N3 以 10%、5% 和 1% 的体积分数与海洋原甲藻混合时的藻菌数量变化

Fig. 5 Population dynamics of strain N3 and *Prorocentrum micans* in the bacterial volume fraction of 10%, 5% and 1%

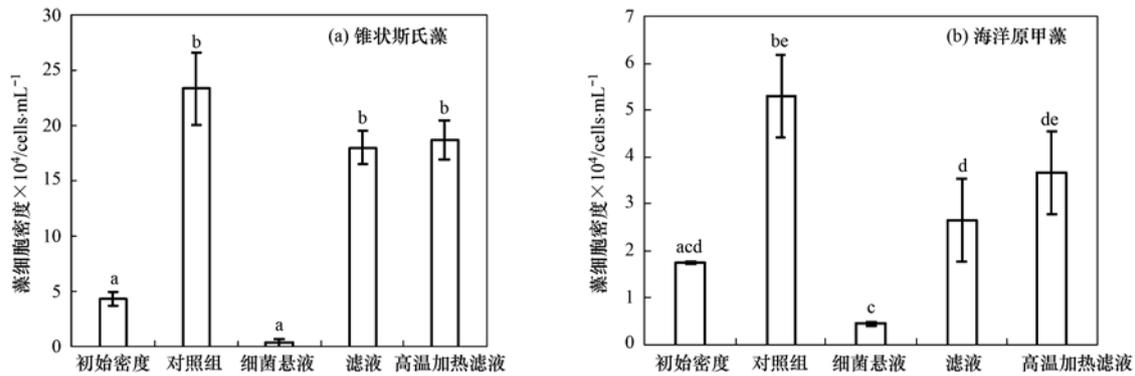
#### 2.4 菌株 N3 对锥状斯氏藻和海洋原甲藻的溶藻方式

涂布平板检测表明，菌株 N3 的滤液与高温加热滤液中均无菌体。锥状斯氏藻混合培养液的藻细胞初始密度为  $(4.3 \pm 0.7) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，对照组至 120 h 藻细胞密度升为  $(2.3 \pm 0.3) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$  [图 6(a)]，菌株 N3 滤液和高温加热滤液处理组的锥状斯氏藻细胞密度至 120 h 分别为  $(1.8 \pm 0.2) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $(1.9 \pm 0.2) \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，与对照组三者的藻细胞密度间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。而细菌悬液处理组的锥状斯氏藻在 120 h 内大量死亡，藻细胞密度降为  $(3.0 \pm 0.3) \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，与对照组、滤液和高温加热滤液处理组间均有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

如图 6(b) 所示，对照组的藻细胞密度在 72 h 内由初始的  $(1.75 \pm 0.3) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$  升为  $(5.3 \pm 0.9) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。菌株 N3 滤液和高温加热滤液处理组的海洋原甲藻细胞密度至 48 h 分别为  $(2.7 \pm 0.8) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $(3.7 \pm 0.9) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，二者间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。而细菌悬液处理组的海洋原甲藻在 72 h 内大量死亡，藻细胞密度为  $(0.4 \pm 0.04) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，与对照组、滤液和高温加热滤液处理组间均有显著差异 ( $P < 0.05$ )。

#### 3 讨论

已报道的具有溶藻活性的细菌的种类包括噬细



图中相同字母表示无显著差异  $P > 0.05$

图 6 锥状斯氏藻和海洋原甲藻的初始密度及不同处理方式的细菌悬液作用下的藻细胞密度

Fig. 6 Population dynamics of *Scripsiella trochoidea* and *Prorocentrum micans* with different treatments of bacterial cultures

胞菌属-黄杆菌属-拟杆菌属类细菌 (*Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides*)<sup>[18]</sup>、属于  $\gamma$ -变形菌纲的弧菌属 (*Vibrio*)<sup>[19]</sup>、假交替单胞菌属 (*Pseudoalteromonas*)<sup>[20]</sup>、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)<sup>[21]</sup> 和 *Hahella* sp.<sup>[22]</sup>, 以及为革兰氏阳性的微球菌属、芽胞杆菌属和动性杆菌属等<sup>[23,24]</sup>. 本实验中溶藻细菌 N3 属于芽胞杆菌属, 对锥状斯氏藻和海洋原甲藻均具有显著的溶藻活性. 许多研究也表明芽胞杆菌属的细菌对多种藻均有溶藻活性, 包括多环旋沟藻 (*Cochlodinium polykrikoides*)<sup>[25]</sup>、蓝藻<sup>[26]</sup> 和铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*)<sup>[27]</sup> 等. Mu 等<sup>[28]</sup> 报道纺锤芽胞杆菌 (*Bacillus fusiformis*) 的代谢物对铜绿微囊藻、小球藻 (*Chlorella* sp.) 和栅列藻 (*Scenedesmus* sp.) 有溶藻效果. Kim 等<sup>[8]</sup> 筛选出的 1 株芽胞杆菌属细菌对血红哈卡藻 (*Akashiwo sanguinea*)、*Fibriocapsa japonica*、赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo*) 和锥状斯氏藻具有溶藻效果. 而本研究筛选出的溶藻细菌 N3 对硅藻 (中肋骨条藻和三角褐指藻) 无溶藻活性, 但对两种甲藻 (锥状斯氏藻和海洋原甲藻) 均有溶藻活性, 且所需的细菌浓度的下限不同, 相比之下, 锥状斯氏藻对菌株 N3 更敏感, 只需 2% 的细菌悬液即可在 120 h 内全部杀死藻细菌, 而菌株 N3 对海洋原甲藻溶藻作用时, 细菌悬液的浓度为 10% 时在 120 h 时仅能杀死 78% 的藻细胞.

溶藻细菌 N3 与藻液混合培养过程中, 与正常环境条件下培养的藻细胞相比, 菌株 N3 先使锥状斯氏藻细胞变形, 细胞膜内物质分布不均匀, 细胞失去运动活性而后死亡, 这与林伟等<sup>[29]</sup> 报道某些细菌可能影响藻细胞的形态的结果相似, 即使藻细胞大小不一, 下沉附底, 促使藻细胞老化. 而对海洋原甲

藻形态的影响则是藻细胞先膨胀成球形, 膜内物质聚集于细胞一端, 而后死亡, 这与 Kim 等<sup>[8]</sup> 分离的 1 株同属芽胞杆菌属的海洋细菌的溶藻现象相似, 该菌株使海洋卡盾藻 (*Chattonella marina*) 的细胞质膜变薄并膨胀成圆形进而溶解死亡.

溶藻细菌的溶藻活性与菌株的密度有关, 溶藻细菌的初始密度越高, 溶藻效果越好<sup>[1,30]</sup>. 菌株 N3 对锥状斯氏藻的溶藻效应研究中, 细菌悬液以 2% 的体积分数接种到藻液中时, 混合液中的溶藻细菌的初始密度较高, 致使藻细胞大量死亡, 至 120 h 时藻细胞全部死亡. 但当细菌悬液的接种量降为 1% 和 0.1% 时, 菌株 N3 无法达到显著的溶藻效果, 仅使藻细胞的生长率略低于对照组. 而菌株 N3 对海洋原甲藻的溶藻效应研究中, 细菌悬液的接种量为 10% 和 5% 时, 混合液中的细菌因其初始密度较高而具有较好的溶藻活性, 分别在 72 h 和 96 h 达到 81% 和 79% 的最大藻细胞死亡率, 之后由于细菌的大量死亡, 藻细胞死亡率下降, 至 120 h 时分别为 78% 和 70%. 而当细菌悬液的接种量降为 1% 时, 菌株 N3 对藻细胞无显著的溶藻活性.

菌株 N3 对锥状斯氏藻和海洋原甲藻的溶藻过程中, 虽然整体上细菌的密度均呈下降趋势, 但其变化过程区别较大, 这可能是由藻液 (藻类代谢产物或藻类死亡产生的有机物) 中含有的细菌生长所必需的营养物质不同或不同种的藻对细菌增长的抑制作用不同所引起. 细菌悬液与锥状斯氏藻混合培养的过程中, 混合液中细菌所需的营养物质较少或藻对细菌生长的抑制作用较强, 致使在高浓度时 (细菌悬液体积分数为 2% 和 1%) 细菌密度在前 24 h 内迅速下降, 之后呈缓慢下降趋势. 而在细菌悬液体积分数为 0.1% 时, 由于细菌的初始密度较低, 使

其在前 24 h 内未出现迅速下降的情况,而是保持这一密度,24 h 后则持续下降.细菌悬液与海洋原甲藻混合培养的过程中,混合液中细菌所需的营养物质虽然较充足,但数量有限,致使细菌密度迅速上升之后又迅速下降,然后,随着藻类的死亡或代谢产生的少量营养物质,使得细菌的密度在这种制约中波动变化.

细菌的溶藻方式分为直接溶藻和间接溶藻<sup>[18]</sup>.直接溶藻是指溶藻细菌在溶藻过程中需要活菌参与直接进攻宿主<sup>[31]</sup>,CFB 菌群的细菌大多通过此方式溶藻<sup>[32,33]</sup>.间接溶藻是指细菌通过分泌代谢产物溶解藻类或者通过营养竞争抑制藻类的生长<sup>[34]</sup>,分泌的杀藻物质主要分为热不稳定物质和热稳定物质<sup>[1,35]</sup>,前者包括多肽和蛋白质等,后者主要包括氨基酸、抗生素、哈尔碱、灵红菌素以及其它一些尚未确定的溶藻物质<sup>[36]</sup>.已报道的芽胞杆菌属细菌既有直接溶藻也有分泌溶藻物质的间接溶藻<sup>[25~27]</sup>.本实验中,菌株 N3 的细菌悬液对锥状斯氏藻和海洋原甲藻均具有显著的溶藻活性,但滤液及加热后滤液的溶藻活性则没有或较弱,且与细菌悬液的溶藻活性间有显著性差异( $P < 0.05$ ),表明菌株 N3 对锥状斯氏藻和海洋原甲藻的溶藻方式相同,均以直接溶藻为主.

#### 4 结论

(1)菌株 N3 的革兰氏染色呈阳性,电镜观察、生理生化鉴定和 16S rRNA 分子鉴定显示其隶属于芽胞杆菌属(*Bacillus* sp.).

(2)菌株 N3 对锥状斯氏藻和海洋原甲藻均有溶藻效应,且都以直接溶藻方式为主.溶藻过程中,菌株 N3 先使锥状斯氏藻细胞变形,细胞膜内物质分布不均匀,细胞失去运动活性而后死亡,而海洋原甲藻的藻细胞则先膨胀成球形,膜内物质聚集于细胞一端,而后死亡.

(3)菌株 N3 对锥状斯氏藻具有显著的溶藻作用,2% 处理组中的藻细胞在 120 h 内全部死亡,而 1% 和 0.1% 处理组中藻细胞密度仍继续增长,只是略低于对照组.而对于海洋原甲藻,10% 和 5% 处理组中藻细胞在 120 h 时的死亡率较高,溶藻作用明显,而 1% 处理组与对照组的藻细胞密度变化无明显差异.菌株 N3 的溶藻效应随溶藻细菌初始密度的增加而增强.

(4)菌株 N3 与锥状斯氏藻和海洋原甲藻藻液混合后,细菌的密度是影响细菌溶藻作用的关键因

素,而溶藻细菌密度随溶藻作用时间的增加而降低,这可能与藻液(藻类培养基和藻类的代谢产物)中含有的细菌生长所必需的营养物质供应不足,以及藻对细菌生长也有抑制作用有关,其具体影响机制有待进一步研究.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Bai S J, Huang L P, Su J Q, *et al.* Algicidal effects of a novel marine actinomycete on the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* [J]. *Current Microbiology*, 2011, **62** (6): 1774-1781.
- [ 2 ] 林永水,周近明,何建宗.赤潮生物[M].北京:科学出版社,2001.7-44.
- [ 3 ] 齐雨藻,钱锋,陈菊芳.中国沿海赤潮[M].北京:科学出版社,2003.20-38.
- [ 4 ] 侯辑.海口近岸海域赤潮发展态势减缓专家提醒:尽量减少游泳等海上活动,不要在赤潮海域取食死亡鱼类[EB/OL].  
<http://www.hainan.gov.cn/data/news/2006/04/11490/>, 2006-04-27.
- [ 5 ] 刘佳,叶庆富,刘永立,等.氮、磷富营养及海带对赤潮三角褐指藻生长的影响[J].核农学报,2008,**22**(4):499-502.
- [ 6 ] Imai I, Sunahara T, Nishikawa T, *et al.* Fluctuations of the red tide *Flagellates chattonella* spp. (Raphidophyceae) and the algicidal bacterium *Cytophaga* sp. in the Seto Inland Sea, Japan [J]. *Marine Biology*, 2001, **138**(5): 1043-1049.
- [ 7 ] 史顺玉,沈银武,李敦海,等.溶藻细菌 DC21 的分离、鉴定及其溶藻特性[J].中国环境科学,2006,**26**(5):587-590.
- [ 8 ] Km M C, Yoshinaga I, Imai I, *et al.* A close relationship between algicidal bacteria and termination of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) blooms in Hiroshima Bay, Japan [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, **170**: 25-32.
- [ 9 ] Mayali X, Doucette G J. Microbial community interactions and population dynamics of an algicidal bacterium active against *Karenia brevis* (Dinophyceae) [J]. *Harmful Algae*, 2002, **1** (3): 277-293.
- [ 10 ] Guillard R R L, Ryther J H. Studies of marine planktonic diatom. I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1962, **8** (2): 229-239.
- [ 11 ] 李丹.六种细菌对赤潮藻 *Scrippsiella trochoidea* 的抑制效应研究[D].广州:暨南大学,2004.8.
- [ 12 ] Kim M J, Jeong S Y, Lee S J. Isolation, identification, and algicidal activity of marine bacteria against *Cochlodinium polykrikoides* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2008, **20**(6): 1069-1078.
- [ 13 ] 东秀珠,蔡妙英,等.常见细菌系统鉴定手册[M].北京:科学出版社,2001.353-398.
- [ 14 ] Dunbar J, Ticknor L O, Kuske C R. Assessment of microbial diversity in four Southwestern United States soils by 16S rRNA gene terminal restriction fragment analysis [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(7): 2943-2950.

- [15] 汪辉, 刘玲, 牛丹丹, 等. 一株海洋细菌对中肋骨条藻的溶解效应及其溶藻特性[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 971-977.
- [16] Bosshard P P, Abels S, Zbinden R, *et al.* Ribosomal DNA sequencing for identification of aerobic gram-positive rods in the clinical laboratory (an 18-month evaluation) [J]. *Journal of Clinical Microbiology*, 2003, **41**(9): 4134-4140.
- [17] Tamura K, Dudley J, Nei M, *et al.* MEGA 4: Molecular evolutionary genetics analysis (MEGA) software version 4.0 [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2007, **24**(8): 1596-1599.
- [18] Mayali X, Azam F. Algicidal bacteria in the sea and their impact on algal blooms [J]. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 2004, **51**(2): 139-144.
- [19] Fu L J, An X L, Li D, *et al.* Isolation and alga-inhibiting characterization of *Vibrio* sp. BS02 against *Alexandrium tamarense* [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2011, **27**(12): 2949-2956.
- [20] Su J Q, Yang X R, Zheng T L, *et al.* Isolation and characterization of a marine algicidal bacterium against the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* [J]. *Harmful Algae*, 2007, **6**(6): 799-810.
- [21] Sakata T, Yoshikawa T, Nishitarumizu S. Algicidal activity and identification of an algicidal substance produced by marine *Pseudomonas* sp. C55a-2 [J]. *Fisheries Science*, 2011, **77**(3): 397-402.
- [22] Jeong H, Yim J H, Lee C, *et al.* Genomic blueprint of *Hahella chejuensis*, a marine microbe producing an algicidal agent [J]. *Nucleic Acids Research*, 2005, **33**(22): 7066-7073.
- [23] Hare E C, Demir E, Coyne J K, *et al.* A bacterium that inhibits the growth of *Pfiesteria piscicida* and other dinoflagellates [J]. *Harmful Algae*, 2005, **4**(2): 221-234.
- [24] Kim Y S, Lee D S, Jeong S Y, *et al.* Isolation and characterization of a marine algicidal bacterium against the harmful raphidophyceae *Chattonella marina* [J]. *The Journal of Microbiology*, 2009, **47**(1): 9-18.
- [25] Jeong S Y, Ishida K, Ito Y, *et al.* Bacillamide, a novel algicide from the marine bacterium, *Bacillus* sp. SY-1, against the harmful dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* [J]. *Tetrahedron Letters*, 2003, **44**(43): 8005-8007.
- [26] 卢兰兰, 李根保, 沈银武, 等. 溶藻细菌 DC-L5 的分离、鉴定及其溶藻特性 [J]. *水生生物学报*, 2009, **33**(5): 860-865.
- [27] 王祥荣, 胡欢, 母锐敏, 等. 1 株铜绿微囊藻降解菌的分离鉴定及其溶藻特征 [J]. *复旦学报 (自然科学版)*, 2010, **49**(1): 94-98.
- [28] Mu R M, Fan Z Q, Pei H Y, *et al.* Isolation and algae-lysing characteristics of the algicidal bacterium B5 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(11): 1336-1340.
- [29] 林伟, 陈騷, 刘秀云. 海洋微藻除菌及除菌与自然带菌微藻生长特点比较 [J]. *海洋与湖沼*, 2000, **31**(6): 647-651.
- [30] 裴海燕, 胡文容, 曲音波, 等. 一株溶藻细菌的分离鉴定及其溶藻特性 [J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(6): 796-802.
- [31] Levin R A. *Saprospira grandis*: a *flexibacterium* that can catch bacterial prey by "ixotrophy" [J]. *Microbial Ecology*, 1997, **34**(3): 232-236.
- [32] Mitsutani A, Takesue K, Kirita M, *et al.* Lysis of *Skeletonema costatum* by *Cytophaga* sp. isolated from the coastal water of the Ariake sea [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1992, **58**(2): 2158-2167.
- [33] Imai I, Ishida Y, Hata Y. Killing of marine phytoplankton by a gliding bacterium *Cytophaga* sp., isolated from the coastal sea of Japan [J]. *Marine Biology*, 1993, **116**(4): 527-532.
- [34] Doucette G J, McGovern E R, Babinchak J A. Algicidal bacteria active against *Gymnodinium breve* (Dinophyceae). I. Bacterial isolation and characterization of killing activity [J]. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(6): 1447-1454.
- [35] Baker K H, Herson D S. Interactions between the diatom *Thalassiosira pseudonana* and an associated pseudomonad in a mariculture system [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, **35**(4): 791-796.
- [36] 邓建明, 陶勇, 李大平, 等. 溶藻细菌及其分子生物学研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2009, **15**(6): 895-900.

## CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies .....	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China .....	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China .....	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective .....	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China .....	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China .....	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River .....	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011 .....	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River .....	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI .....	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD <sub>5</sub> and COD in Urban Runoff of Wenzhou City .....	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters .....	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO <sub>2</sub> and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring .....	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment .....	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate .....	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System .....	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products .....	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud .....	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment .....	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring .....	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors .....	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water .....	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties .....	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A <sup>2</sup> /O-MBR Process .....	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors .....	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N <sub>2</sub> O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process .....	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples .....	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i> .....	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province .....	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds .....	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province .....	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids .....	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China .....	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia .....	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province .....	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites .....	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings .....	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China .....	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage .....	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics .....	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether .....	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics .....	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011 .....	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang .....	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer .....	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou .....	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China .....	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China .....	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai .....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event .....	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China .....	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method .....	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing .....	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant .....	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port .....	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal .....	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing .....	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行