

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

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

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌 <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13 的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响

李鸿妹^{1,2}, 石晓勇^{1,2}, 丁雁雁^{1,2}, 唐洪杰^{1,2*}

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 选用东海赤潮高发区两种典型赤潮藻种: 东海原甲藻和中肋骨条藻, 采用实验室一次性培养, 参照东海海水的实际光照, 研究了不同自然光强对两种赤潮藻生长及硝酸还原酶活性(NRA)的影响。结果表明在 30~60 W·m⁻²光照范围内, 东海原甲藻和中肋骨条藻均能正常生长, 生长曲线皆为 S 型; 而光强为 9 W·m⁻²和 0 W·m⁻²时, 东海原甲藻和中肋骨条藻几乎无法生长。在实验设定的 0~60 W·m⁻²范围内, 两种藻的硝酸还原酶活性最大值 NRA_{max}、最大生长速率 μ_{max} 和终止生物量 B_f 随光照的变化趋势一致, 说明光的强弱通过影响细胞硝酸还原酶活性大小间接影响藻类的生长。中肋骨条藻的最大生长速率及单位体积的 NRA_{max} 在数值上均远大于东海原甲藻, 表明相对于东海原甲藻而言, 中肋骨条藻能更好地利用硝酸盐。

关键词: 硝酸还原酶活性; 光照; 东海原甲藻; 中肋骨条藻; 最大生长速率

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3391-07

Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea

LI Hong-mei^{1,2}, SHI Xiao-yong^{1,2}, DING Yan-yan^{1,2}, TANG Hong-jie^{1,2}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Two typical red-tide algae, *Skeletonema costatum* and *Prorocentrum donghaiense* were selected as studied objects. The nitrate reductase activity (NRA) and the growth of the two algae under different illuminations through incubation experiment were studied. The illumination condition was consistent with *in situ*. Results showed that *P. donghaiense* and *S. costatum* could grow normally in the solar radiation ranged from 30-60 W·m⁻², and the growth curve was "S" type. However, when solar radiation was below 9 W·m⁻², the two alga could hardly grow. In the range of 0-60 W·m⁻², three parameters (NRA_{max}, μ_{max} , B_f) increased with the increasing of light intensity, indicating that the light intensity can influence the grow of alga indirectly through influencing the nitrate reductase activity. The μ_{max} and NRA_{max} in unite volume of *Skeletonema costatum* were higher than those of *Prorocentrum donghaiense*, indicating that *Skeletonema costatum* can better utilize the nitrate than *Prorocentrum donghaiense*.

Key words: nitrate reductase activity (NRA); illumination; *Skeletonema costatum*; *Prorocentrum donghaiense*; maximum growth rate

进入 21 世纪以来,我国赤潮仍频频发生,赤潮藻种类越来越多,其危害愈来愈严重,已经严重影响海洋生态经济的发展^[1~7]。其中东海发生赤潮的频次居于中国四大海域之首,占四大海域赤潮发生频次的 63.3%。由于赤潮发生因素众多、赤潮发生机制复杂,到目前为止赤潮发生机制仍未得到明确的解释。相关研究表明,除外界营养物质供应充足外,光照这一外界环境因子在赤潮发生过程中也起到至关重要的作用。

海洋中浮游植物生长离不开对营养盐的吸收转化,其中,NO₃⁻-N 是海水中最主要的氮存在形态^[8],浮游植物对硝酸盐的吸收需经过细胞体内一系列酶的还原作用,硝酸还原酶(NR)作为硝酸盐同化步骤中的初始酶及限速酶^[9,10],其活性大小直接影响着浮游植物对硝酸盐的吸收利用,进而导致浮游植物生长的差异。硝酸还原酶活性(NRA)大小指示着藻

细胞对硝酸盐的利用情况,以往围绕硝酸还原酶活性展开的相关研究表明,浮游植物生长与硝酸还原酶活性之间存在一定相关性^[11~14],但对于光照是否影响及如何影响海洋微藻硝酸还原酶活性及藻生长情况的研究较少。本研究参照东海海水的实际光照,选用东海赤潮高发区两种典型赤潮藻种——东海原甲藻和中肋骨条藻,采用实验室一次性培养,分析了不同自然光强对两种赤潮藻生长及 NRA 的影响,以期从生理指标硝酸还原酶的角度探讨东海典型赤潮藻细胞 NRA 与藻生长之间的关系,为进一步了解影响东海赤潮发生的因素及其对于赤潮生消及

收稿日期: 2012-12-06; 修订日期: 2013-01-21

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB428701)

作者简介: 李鸿妹(1987~),女,博士研究生,主要研究方向为海洋污染生态化学与海水分析化学, E-mail: haiyanglihongmei@163.com

* 通讯联系人, E-mail: thjie@ouc.edu.cn

演替的作用提供数据资料和理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验选择东海赤潮高发区常见的 2 种主要赤潮藻——中肋骨条藻和东海原甲藻,分别隶属于硅藻门和甲藻门。其中东海原甲藻由中国海洋大学海洋污染生态化学实验室藻种室提供,中肋骨条藻为厦门大学近海海洋国家重点实验室海洋微生物保种中心(CCMBP)提供。

1.2 实验设计

在初始营养盐浓度相同($N:32 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $P:1.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $Si:32 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素和维生素浓度同 f/2 培养液配方),温度 20°C 下,进行光照培养实验,设置 5 个光照水平,通过 5 L 无色塑料桶外套白纱布、黑纱布及锡纸来调节透光率为自然光照的 100%、75%、50%、15% 和 0%,每组遮光率对赤潮藻生长的影响设置 3 个平行实验。表 1 列出了实验所用的黑白纱布的遮光率情况。

表 1 实验材料纱布的遮光率(100%)

Table 1 Shading rate of gauze			
纱袋	1 层白纱	3 层白纱	2 层黑纱
测量次数	10	10	10
平均值 $\pm$ SD/%	73 ± 5	46 ± 4	14 ± 2

1.3 实验方法

取一定体积的天然海水经孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤后用高压灭菌锅在 120°C 的条件下灭菌 20 min,静置冷却至室温,然后转移至经过高温灭菌处理过的锥形瓶中,参照东海赤潮发生时现场营养盐浓度范围,其它生源要素按照 f/2 营养液配方配制培养基,在不同光照条件下进行藻种的驯化,驯化过程中每天摇晃锥形瓶 3 次,以防止藻的絮凝,粘连及贴壁生长,每隔 7 d 换一次培养液保种,以保持藻细胞的较高活性,反复接种 3~4 次。

将已经驯化好的处于指数生长期的藻细胞接种于 5 L 无色塑料培养桶中,培养液体积为 4.5 L 左右,分别包裹上白纱布、黑纱布或锡纸在 20°C 下培养。初始接种藻密度均在 $10^3 \text{ cells}\cdot\text{mL}^{-1}$ 左右。每天固定时间(08:00)过滤取样,进行当天藻细胞硝酸还原酶活性的测定及藻密度的计数。

1.4 分析测试方法与数据处理

1.4.1 硝酸还原酶的提取及其活性测定

硝酸还原酶的提取及其活性(NRA)测定参考文献[15,16]的方法进行。藻细胞经 Whatman GF/F

玻璃纤维膜($\Phi = 25 \text{ mm}$)减压过滤收集。样品加入 1 mL 提取缓冲液后以玻璃匀浆器于 4°C 下破碎藻细胞并在 4°C $12\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 5 min,取上清液 300 μL 用于酶促反应,反应液终体积为 1 mL,30 min 后加入 2 mL $550 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的醋酸锌终止反应,并将反应产物在 $8\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 20 min,上清液内加入吩嗪硫酸甲酯(PMS)溶液于 30°C 下氧化 20 min 后加入磺胺- α -萘乙二胺显色剂显色 15 min,于 540 nm 下测定吸光值(A_{540}),酶活性(NRA)以单个细胞单位时间内生成的 NO_2^- -N 量来表征,硝酸还原酶活力单位(以 NO_2^- 计)为 $\text{fmol}\cdot(\text{cell}\cdot\text{min})^{-1}$ 。由于每组实验设置 3 个平行样,所以,最终酶活性值(NRA)为 3 组实验取平均值,所得数据以平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD)表示。

1.4.2 赤潮藻生长状态表征参数的拟合

自接种当天起,每隔 24 h 取样(取样前须摇匀),样品用 Lugol's 试剂固定,采用显微镜目视计数法进行藻密度计数,每个样品计数 3 次取其平均值。根据“细胞密度-时间”的变化曲线,采用 S-logistic2 种群增长模型公式用 Origin 软件进行非线性拟合可得到各培养条件下浮游植物生长状态表征参数 B_t 和 $\mu_{\max}^{[17]}$,S-logistic2 模型方程形式表示如下:

$$B_t = \frac{B_f}{1 + \frac{B_f - B_0}{B_0} \cdot \exp\left(-\frac{4\mu_{\max}}{B_f} \cdot t\right)}$$

式中, B_t 为 t 时刻(d)总生物量(藻密度, $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$), B_0 表示初始生物量($\text{cell}\cdot\text{mL}^{-1}$), B_f 为终止生物量($\text{cell}\cdot\text{mL}^{-1}$), $\mu_{\max}$ 为最大生长速率 [$\text{cell}\cdot(\text{mL}\cdot\text{d})^{-1}$]。

1.4.3 太阳日辐射通量数据的来源

孙百晔等^[18,19]对 2000 年和 2002 年共 88 d 的南海海面太阳辐射实际观测数据与美国国家环境预测中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)的合作项目 NCEP 全球再分析资料提供的数据进行对比分析,结果显示 NCEP 数据与实测数据反映的趋势基本一致;进一步的配对法 t 检验表明二组数据之间没有显著性差异;并且二者呈极显著的相关关系($R^2 = 0.1614$, $n = 88$, $P = 0.0001$),因此认为 NCEP 数据能很好地反映海洋太阳辐射的实际特征,可以用来进行海面太阳辐射特征研究。据此,本研究利用 NCEP 提供的青岛地区($35^\circ35' \sim 37.9^\circ\text{N}$, $119.5^\circ \sim 121^\circ\text{E}$)太阳日辐射数据^[20]作为实验的光照数据。本实验中 100% 自然光强即为 NCEP 提供的青岛地区的光照数据 $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。进行培养实验时的自然

光照见表 2.

表 2 实验进行时的绝对光强数据 (PAR)/W·m ⁻²			
Table 2 Data of light intensity during the experiment (PAR)/W·m ⁻²			
透光率/%	东海原甲藻	中肋骨条藻	文中表述光强
100	58.0 ± 10.1	55.7 ± 3.7	60
75	43.5 ± 7.6	41.8 ± 2.8	45
50	29.0 ± 5.1	27.9 ± 1.9	30
15	8.7 ± 1.5	8.4 ± 0.6	9
0	0	0	0

2 结果与讨论

光照是海洋浮游植物生长的能量来源,是其能够进行光合作用的必要条件^[21]. 大量研究表明浮游植物生长存在一个最适光强,赤潮发生时,藻密度的最大值往往出现在次表层,表层光照太强,抑制了浮游藻类的生长. 氮、磷等营养盐是海洋中藻类生长所必须的基础营养物质,藻只有能够有效利用氮、磷等营养物质才表现为生长,氮素中的硝酸盐是藻类生长繁殖所必需的营养元素之一,硝酸还原酶作为浮游植物同化 NO₃⁻-N 的初始酶也是限速酶,决定着硝酸盐的吸收利用速率,而硝酸还原酶作为一种蛋白酶,极易受外界环境的影响.

2.1 光照对东海原甲藻生长及硝酸还原酶活性的影响

在温度、初始营养盐浓度相同 (N: 32 μmol·L⁻¹, P: 1.5 μmol·L⁻¹; 温度 20℃,下同),而不同光照的条件下,东海原甲藻的生长及硝酸还原酶活性情况见图 1. 从中可以看出,在光照强度较低时(0 和 9 W·m⁻²光照下),东海原甲藻的生长情况较差,几乎无法正常生长,其硝酸还原酶活性随时间的变化曲线未表现出明显的规律;当光照强度较高时(30、45 和 60 W·m⁻²光照下),东海原甲藻均能正常生长,藻细胞硝酸还原酶活性随培养时间的变化出现先增加后降低的不对称倒 V 形变化趋势.

具体而言,光照强度为 60 W·m⁻²和 45 W·m⁻²时[图 1(a)、1(b)],东海原甲藻藻密度-培养时间和 NRA-培养时间在两种光照下的变化趋势基本一致. 初始接种藻密度在10³ cells·mL⁻¹左右,进入新的环境出现了 1~2 d 的生长缓慢期,之后进入指数生长期,藻密度迅速增加,指数生长期维持 7~9 d 后进入生长平台期,最大藻密度分别达到 6.7 × 10⁴ cells·mL⁻¹和 6.1 × 10⁴ cells·mL⁻¹,是初始接种藻密度的 60 多倍. 就这两个光照条件下藻密度随培养时间的变化曲线来说,东海原甲藻在光强 45~60

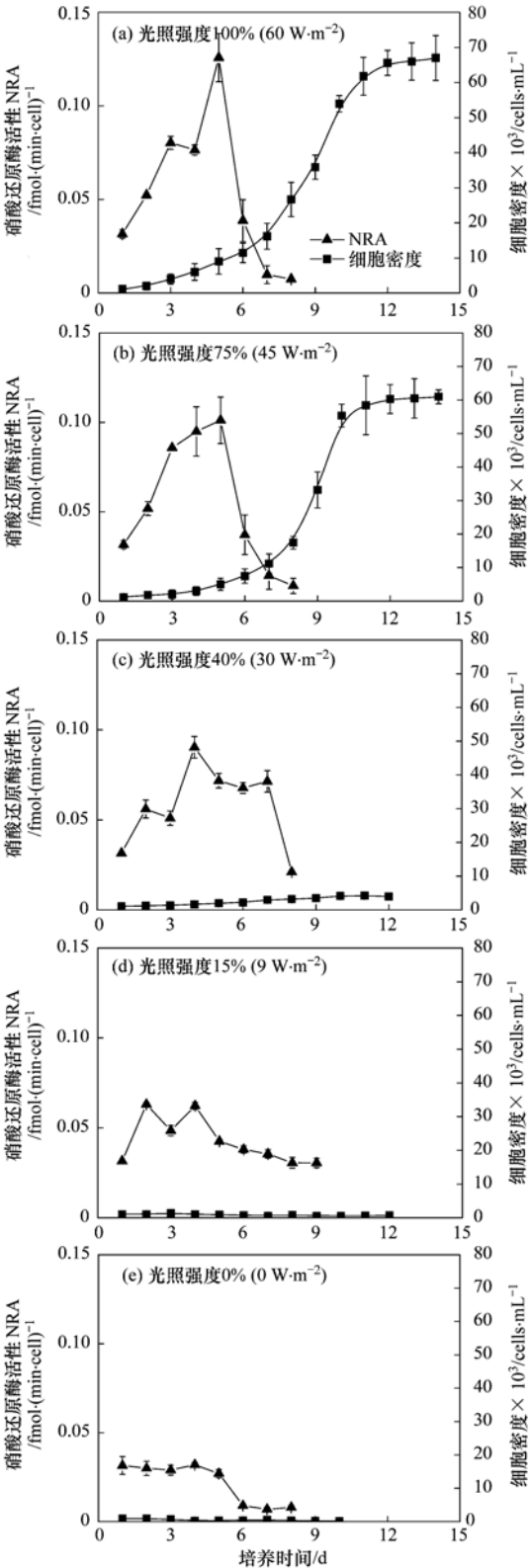


图 1 不同光照梯度下东海原甲藻的生长曲线及 NRA 的变化曲线
Fig. 1 Plots of the growth of *Prorocentrum donghaiense* and NRA variety under different light gradients

W·m⁻²范围内均能正常生长. NRA 随时间的变化趋势也呈现慢升快降的不对称倒“V”形曲线,且从 NRA 和藻生长曲线的综合变化来看,NRA 的变化在

一定程度上能够反映藻的生长状态, NRA 不断增大, 藻细胞数量也持续增加; 光强为 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 [图 1(c)], 东海原甲藻虽有所生长, 但生长缓慢, 最大生长速率仅为 $0.4 \times 10^3 \text{ cells} \cdot (\text{mL} \cdot \text{d})^{-1}$, 最大藻密度为 $5.7 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 也仅是初始接种藻密度的 6 倍, 生长情况明显差于 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的生长情况. NRA 曲线也不像前两者表现出很好的规律, 但整体符合慢升快降的规律. 在接种后第 4 d 出现 $\text{NRA}_{\max}$, 东海原甲藻生长呈指数式增长, 随后 NRA 逐渐下降; $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [图 1(d)、1(e)] 光强的培养实验由于光照极不适宜, 自接种后第 1 d 就出现藻细胞数量下降的趋势, 生长曲线呈现波动性下降. NRA 则呈现不规则的变化状态, 藻密度自接种后也呈波动性下降. 说明此时光照极不适宜, 在光照低于 $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时不利于东海原甲藻的生长增殖. 此外, 由光照对东海原甲藻生长曲线及 NRA 的变化曲线来看, 各培养组的 $\text{NRA}_{\max}$ 均出现在藻细胞的指数生长期内, 藻细胞的 $\text{NRA}_{\max}$ 出现时间早于最大藻密度出现的时间, 即藻的生长与硝酸还原酶活性相比, 前者存在一定的滞后效应, 滞后时间约 3~6 d.

为进一步分析光强对东海原甲藻细胞内 NRA 水

平、藻的生长及 NRA 与藻生长之间关系的影响, 本研究对硝酸还原酶活性最大值 ($\text{NRA}_{\max}$)、最大生长速率 ($\mu_{\max}$)、终止生物量 (B_f) 随光照强度的变化趋势进行了研究, 如图 2 所示. 本实验设置的 5 个光照梯度下, 光照强度从 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 东海原甲藻终止生物量 B_f 由 $0.9 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 增加至 $66 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 最大生长速率 $\mu_{\max}$ 也随光照的增强而不断增大; 另外, $\text{NRA}_{\max}$ 随光强变化与 B_f 、 $\mu_{\max}$ 随光强的变化规律相同, 光照越强, $\text{NRA}_{\max}$ 也越大. $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 $\text{NRA}_{\max}$ 达到培养条件下的最大值, 此时, 东海原甲藻 $\mu_{\max}$ 、 B_f 均最高.

此外, 从本研究的实验结果来看, 在海水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $32 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度为 $1.5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 海水温度为 20°C 的情况下, $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光照条件下东海原甲藻仍能生长, 而孙百晔^[22] 2004 年 5 月在东海 RC15 站的现场培养实验, 光照 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时藻的生长已经下降, 出现这种差异的原因可能是本实验在 1 月进行, 光照时间较孙百晔^[22] 的 5 月短很多, 光照时间长短的差异可能是导致 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的自然光强不抑制东海原甲藻生长的原因, 也有报道指出光照时间的长短可能会影响东海原甲藻的生长^[23].

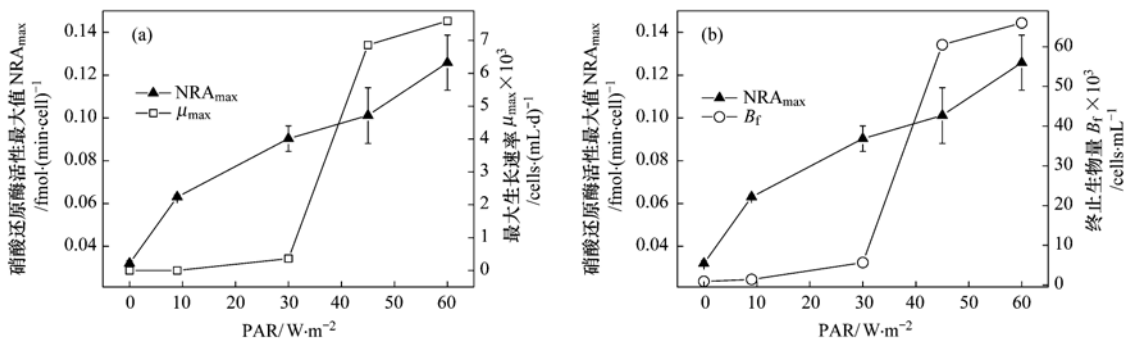


图 2 东海原甲藻的 $\text{NRA}_{\max}$ 、 $\mu_{\max}$ 及 B_f 随光照强度的变化趋势

Fig. 2 Varieties of $\text{NRA}_{\max}$, $\mu_{\max}$ and B_f of *Prorocentrum donghaiense* under different light intensities

2.2 光照对中肋骨条藻及硝酸还原酶活性的影响

图 3 为相同温度、相同初始营养盐水平 (同东海原甲藻)、不同光照条件下培养的中肋骨条藻硝酸还原酶活性 (NRA) 及藻密度随培养时间的变化曲线. 从中可以看出, 中肋骨条藻的生长曲线和 NRA 随培养时间的变化曲线, 除 $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 外, 在实验设定的其他 3 个光照条件下表现出相似的规律, 光照强度为 60 、 45 和 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的生长曲线基本符合 S-logistic2 种群增长模型 S 型曲线, 在接种后很快进入指数生长期, 一般维持 3~

4 d, 然后直接进入衰亡期; NRA 随时间变化曲线也基本符合慢升快降的规律, 中肋骨条藻的生长情况与 NRA 活性大小存在一定的关系.

具体而言, 光照为 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时 [图 3(a)、3(b)], 中肋骨条藻能很快适应新的环境, 均在接种第 3 d 进入指数生长期, 藻密度指数式增加, 在第 6 d 达到藻密度最大值, 分别为 $6.3 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $4.9 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 可以看出光照为 $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时的藻密度最大值小于光照为 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 约为其的 4/5, 之后藻密度均迅速下降, 几乎不

存在生长平台期,在接种第7 d,即出现负增长,直接进入了衰亡期;光照 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时[图 3(c)],中肋

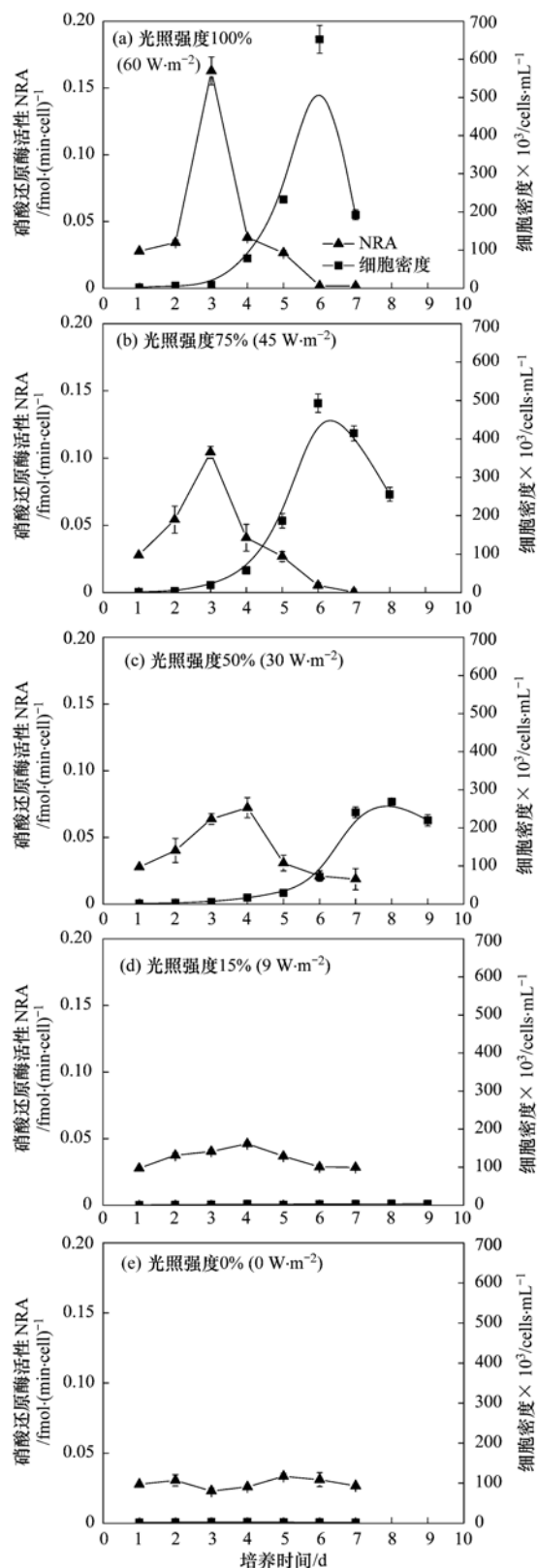


图3 不同光照梯度下中肋骨条藻的生长曲线及 NRA 的变化曲线

Fig. 3 Plots of the growth of *Skeletonema costatum* and NRA variety under different light gradients

骨条藻的整个生长曲线与前两者类似,也没有出现完整的生长周期,接种后前3 d 生长较慢,藻密度缓缓增加,至第4 d 开始进入指数生长期,接种后第7 d 达到藻细胞数量的峰值,随后下降,该光照条件下的藻密度最大值为 $2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$,约是初始接种藻密度的180倍。然而, $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 光照条件下中肋骨条藻的生长明显劣于上述3个光照条件[图3(d)、3(e)],实验设定的这两个光照下中肋骨条藻几乎没有生长,最大藻密度分别为 $4.2 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $3.1 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$,分别为初始接种藻密度的4.6和3倍,由此可见,光照低于 $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,中肋骨条藻无法正常生长。

中肋骨条藻的生长离不开藻细胞对硝酸盐的同化,这在硝酸还原酶活性(NRA)随培养时间的变化曲线上也有所体现(图3)。光强大于 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, NRA 随时间的变化曲线与东海原甲藻 NRA 变化趋势类似,均呈现不对称倒V形,符合慢升快降的规律,其原因可能是藻细胞在适应新环境的过程中,缓慢吸收环境中的硝酸盐,硝酸还原酶活性也缓慢增加,在指数生长期内活性达到最大值,随着细胞数量的增加、硝酸盐的大量消耗和亚硝酸盐在细胞质中的积累,导致硝酸还原酶活性迅速降低;而低于 $9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的光照条件下,由于光照强度太低,光合作用较弱甚至无法进行光合作用,藻细胞对硝酸盐也无从利用, NRA 水平(以 NO_2^- 计)较低,基本维持在 $0.030 \text{ fmol} \cdot (\text{cell} \cdot \text{min})^{-1}$ 左右,总体变化不大。

综合以上分析和图4所示的 $\text{NRA}_{\max}$ 、 B_f 、 $\mu_{\max}$ 随光强的变化曲线可知,当温度、营养盐等条件相同时,光强在 $0 \sim 60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围(即由0光照增至100%光照)时,各培养组的 $\text{NRA}_{\max}$ 、终止生物量 B_f 和最大生长速率 $\mu_{\max}$ 随光强的变化趋势相一致,即随着光照强度的增强,各培养组的 $\text{NRA}_{\max}$ 也逐渐增大,终止生物量 B_f 和最大生长速率 $\mu_{\max}$ 也不断增大。此外,在 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,中肋骨条藻的最大生长速率 $\mu_{\max}$ 达 $8 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$,与孙百晔等^[19]在现场培养的中肋骨条藻在光照 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右时的最大生长速率相当,依据孙百晔等^[19]的中肋骨条藻生长情况,初步推测,本实验的 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 还远未达到其适宜的饱和光照。

有报道,光照强弱及光照时间周期的长短对硅藻尤其是中肋骨条藻的光合作用效率有至关重要的作用,也影响藻类的生长速率^[24]。本实验也基本证实,光照强度影响藻细胞内硝酸还原酶的活性,从而影响了藻对硝酸盐的同化,进而导致了各光照强度

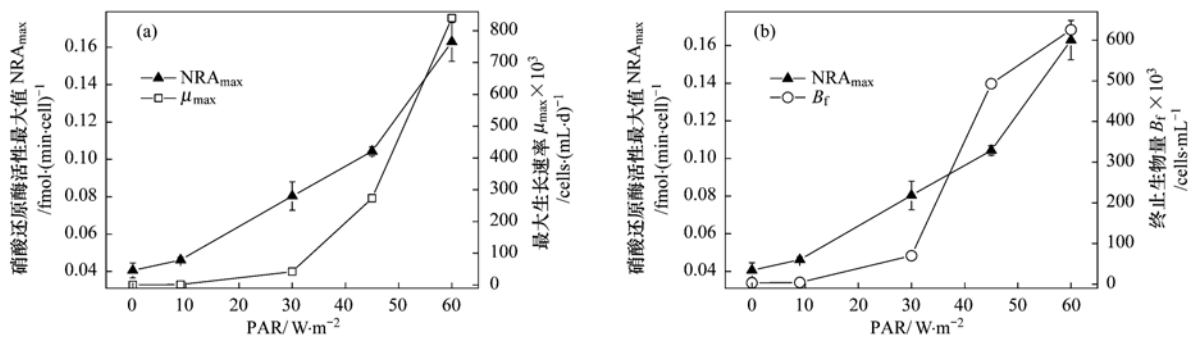


图 4 中肋骨条藻的 NRA_{max} 、 μ_{max} 及 B_f 随光照强度的变化趋势

Fig. 4 Varieties of NRA_{max} , μ_{max} and B_f of *Skeletonema costatum* under different light intensities

下中肋骨条藻生长的差异.

2.3 光照对东海原甲藻及中肋骨条藻硝酸还原酶活性影响的对比

通过本研究的实验结果发现,光照可以明显地影响赤潮藻的生长,这与以往的研究结果相一致^[25~28]. 由于硝酸还原酶为细胞内的诱导酶,为合理进行两种藻间硝酸还原酶活性的比较,考虑到不同藻种间细胞体积存在一定的差异,因此将两种藻 NRA_{max} 进行体积归一化,即以单位体积内硝酸还原酶活性的大小为参数,进行藻种间的比较. 各光照

条件下中肋骨条藻和东海原甲藻的最大生长速率和单位体积硝酸还原酶活性 (NRA_{max})_v 值见表 3. 从中可以看出,在光强 0 ~ 60 W·m⁻² 范围内,相同光照下的单位细胞体积中肋骨条藻硝酸还原酶活性均高于东海原甲藻的硝酸还原酶活性,且中肋骨条藻最大生长速率也高于东海原甲藻. 这说明,在本研究的初始营养盐浓度、温度下 (N:32 μmol·L⁻¹, P: 1.5 μmol·L⁻¹, Si: 32 μmol·L⁻¹; 温度 20℃), 相对于东海原甲藻而言,中肋骨条藻能更好地利用营养盐来进行生长繁殖.

表 3 不同光强下 S_k 和 P_r 最大生长速率 (μ_{max}) 和单位体积最大硝酸还原酶活性 (NRA_{max})_v 数据

Table 3 Data of μ_{max} and (NRA_{max})_v in units of S_k and P_r under different light intensities

光照强度 (PAR) / $W \cdot m^{-2}$	单位体积最大硝酸还原酶活性 (NRA_{max}) _v / $\mu m^3 \cdot f mol \cdot (cell \cdot min)^{-1}$		最大生长速率 (μ_{max}) / $cell \cdot (mL \cdot d)^{-1}$	
	中肋骨条藻 (S_k)	东海原甲藻 (P_r)	中肋骨条藻 (S_k)	东海原甲藻 (P_r)
60	1.27×10^{-3}	1.49×10^{-4}	8.40×10^5	7.60×10^3
45	8.10×10^{-4}	1.19×10^{-4}	2.73×10^5	6.86×10^3
30	5.62×10^{-4}	1.07×10^{-4}	4.24×10^4	3.66×10^2
9	3.59×10^{-4}	7.35×10^{-5}	1.36×10^3	0
0	2.60×10^{-4}	3.78×10^{-5}	6.44×10^2	0

3 结论

(1)在 30 ~ 60 W·m⁻²光照范围内,东海原甲藻和中肋骨条藻均能正常生长,两种藻先经过短暂的延滞期,随后进入指数生长期,生长曲线皆为 S 型,可用 Logistic2 模型描述;而光强为 9 W·m⁻² 和 0 W·m⁻²时,东海原甲藻和中肋骨条藻的藻生长曲线皆呈现波动性下降趋势,几乎无法生长.

(2)东海原甲藻和中肋骨条藻硝酸还原酶活性随培养时间的变化趋势均呈现慢升快降的不对称倒 V 形曲线,最大酶活性均出现在将近指数生长期的时刻. 两种藻最大硝酸还原酶活性 (NRA_{max}) 随光强变化与最大生长速率 (μ_{max}) 和终止生物量 (B_f) 随光强的变化一致,即在实验设定的 0 ~ 60 W·m⁻² 范围

内,随着光强的增大, NRA_{max} 、 μ_{max} 和 B_f 也逐渐增大,两种藻均没有出现强光抑制现象,光的强弱可在一定程度上通过影响细胞硝酸还原酶活性大小间接影响藻类的生长.

(3)在相同的初始营养盐浓度、温度下 (N:32 μmol·L⁻¹, P:1.5 μmol·L⁻¹, Si:32 μmol·L⁻¹; 温度 20℃),单位细胞体积中肋骨条藻硝酸还原酶活性均高于东海原甲藻的硝酸还原酶活性,这说明相对于东海原甲藻,中肋骨条藻能更好地利用营养盐进行生长繁殖.

参考文献:

[1] 申力, 许惠平, 吴萍. 长江口及东海赤潮海洋环境特征综合探讨[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(5): 631-635.
[2] 刘录三, 李子成, 周娟, 等. 长江口及其邻近海域赤潮时空分布研究[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2497-2504.

- [3] 周名江, 颜天, 邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1031-1038.
- [4] 周名江, 朱明远. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, **21**(7): 673-682.
- [5] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. 生命科学, 2001, **13**(2): 54-59, 53.
- [6] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River[J]. Continental Shelf Research, 2008, **28**(12): 1483-1489.
- [7] Zhu M Y, Xu Z J, Li R X, *et al.* Interspecies competition for nutrients between *Prorocentrum donghaiense* Lu and *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve in mesocosm experiments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, **28**(1): 72-82.
- [8] 袁骥, 王云龙, 沈新强. N 和 P 对东海中北部浮游植物的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(4): 5-8.
- [9] Josep L H, Villareal T A, Lipschultz F. A high sensitivity nitrate reductase assay and its application to vertically migrating *Rhizosolenia* mats[J]. Aquatic Microbial Ecology, 1997, **12**(1): 95-104.
- [10] May S K, 顾立江, 程红梅. 植物中硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的作用[J]. 生物技术进展, 2011, **1**(3): 159-164.
- [11] 崔杰, 曲文章. 甜菜硝酸还原酶活性的研究[J]. 甜菜糖业, 1990, **15**(1): 6-9.
- [12] 李斌, 欧林坚, 吕颂辉. 不同氮源对海洋卡盾藻生长和硝酸还原酶活性的影响[J]. 海洋环境科学, 2009, **28**(3): 264-267.
- [13] 王金花, 唐洪杰, 杨茹君, 等. 氮磷营养盐对中肋骨条藻生长及硝酸还原酶活性的影响[J]. 海洋科学, 2008, **32**(12): 64-68.
- [14] 王金花, 唐洪杰, 王修林, 等. 氮、磷营养盐对东海原甲藻生长和硝酸还原酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14**(5): 620-623.
- [15] Berges J A, Harrison P J. Nitrate reductase activity quantitatively predicts the rate of nitrate incorporation under steady state light limitation: a revised assay and characterization of the enzyme in three species of marine phytoplankton [J]. Limnology & Oceanography, 1995, **40**(1): 82-93.
- [16] 唐洪杰, 王修林, 祝陈坚, 等. 两种海洋微藻硝酸还原酶活性测定方法的比较研究[J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2006, **36**(6): 981-986.
- [17] 王修林, 邓宁宁, 祝陈坚, 等. 磷酸盐、硝酸盐组成对海洋赤潮藻生长的影响[J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2004, **34**(3): 453-460.
- [18] 孙百晔, 王修林, 阚世红, 等. 东海海面太阳辐射近 60a 的变化与赤潮的关系[J]. 海洋环境科学, 2009, **28**(1): 1-4, 25.
- [19] 孙百晔, 梁生康, 王长友, 等. 光照与东海近海中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 赤潮发生季节的关系[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1849-1854.
- [20] Sandnes J M, Källqvist T, Wenner D, *et al.* Combined influence of light and temperature on growth rates of *Nannochloropsis oceanica*: linking cellular responses to large-scale biomass production[J]. Journal of Applied Phycology, 2005, **17**(6): 515-525.
- [21] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, **77**(3): 437-471.
- [22] 孙百晔, 王修林, 李雁宾, 等. 光照在东海近海东海原甲藻赤潮发生中的作用[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 362-367.
- [23] 孙岁寒, 段舜山. 东海原甲藻的光周期效应研究[J]. 生态环境, 2006, **15**(3): 461-464.
- [24] 朱明, 张学成, 茅云翔, 等. 温度、盐度及光照强度对海链藻 (*Thalassiosira* sp.) 生长的影响[J]. 海洋科学, 2003, **27**(12): 58-61.
- [25] Anning T, Macintyre H, Pratt S M, *et al.* Photoacclimation in the marine diatom *Skeletonema costatum* [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(8): 1807-1817.
- [26] Thompson P. The response of growth and biochemical composition to variations in daylength, temperature, and irradiance in the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* (bacillariophyceae) [J]. Journal of Phycology, 1999, **35**(6): 1215-1223.
- [27] 王爱军, 王修林, 韩秀荣, 等. 光照对东海赤潮高发区春季赤潮藻种生长和演替的影响[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(2): 144-148.
- [28] Zhang X C, Brammer E, Pedersen M, *et al.* Effect of light flux density and its spectra quality on photosynthesis and respiration in *Porphyra yezoensis* (Bangiales, Rhodophyta) [J]. Phycological Research, 1997, **45**(2): 29-37.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-yi, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人