

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 ..... 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 ..... 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 ..... 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 ..... 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM<sub>10</sub>可替代源成分谱的建立方法及其应用 ..... 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 ..... 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 ..... 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 ..... 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 ..... 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 ..... 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 ..... 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 ..... 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 ..... 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 ..... 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 ..... 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 ..... 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 ..... 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 ..... 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 ..... 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 ..... 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 ..... 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 ..... 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 ..... 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 ..... 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>对厌氧氨氧化污泥活性的影响 ..... 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 ..... 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N<sub>2</sub>O 产生量的影响 ..... 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 ..... 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 ..... 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 ..... 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 ..... 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 ..... 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 ..... 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 ..... 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 ..... 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 ..... 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 ..... 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 ..... 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 ..... 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 ..... 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 ..... 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 ..... 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 ..... 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N<sub>2</sub>O 产生的影响 ..... 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 ..... 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 ..... 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 ..... 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 ..... 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

# 光质对蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 生长特征及生化组成的影响研究

唐青青, 方治国\*, 嵇雯雯, 夏会龙

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 采用发光二极管(light emitting diode, LED)调制光谱,研究了不同光质(红光、蓝光、白光、红蓝混光 8:1, 红蓝混光 8:2, 红蓝混光 8:3)对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特性及生化组成的影响. 结果表明,蓝光下蛋白核小球藻生长效果最佳,其接种后培养 30 d,光密度为 2.4,比生长速率为  $0.10 \text{ d}^{-1}$ ,生物量为  $0.64 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而其它光质下光密度、比生长速率和生物量分别在  $1.0 \sim 1.7$ 、 $0.07 \sim 0.10 \text{ d}^{-1}$ 和  $0.27 \sim 0.38 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,蓝光条件下其光密度、比生长速率和生物量分别约为红光下的 2.05 倍、1.33 倍和 2.06 倍;红蓝混光有利于蛋白核小球藻叶绿素 a 和  $\beta$ -胡萝卜素的合成,蓝光可促进叶绿素 b 的合成,红蓝混光 8:1 其叶绿素 a 和  $\beta$ -胡萝卜素的含量分别为  $13.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和  $5.8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而蓝光下分别为  $8.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和  $3.6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;红蓝混光更有利于蛋白核小球藻单位细胞干重蛋白质和总脂的积累,红蓝 8:3 蛋白质含量为  $489.3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,红蓝 8:1 总脂含量为  $311.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而蓝光下蛋白质和总脂含量均较低,分别为  $400.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和  $231.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .

**关键词:** 蛋白核小球藻; LED; 光质; 生长特性; 红蓝混光

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4212-06 DOI: 10.13227/j.hjx.2014.11.024

## Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of *Chlorella pyrenoidosa*

TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, XIA Hui-long

(College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Effect of light quality, including red light, blue light, white light, red and blue mixing light with ratios of 8:1, 8:2 and 8:3, on the growth characteristics and biochemical composition of *Chlorella pyrenoidosa* was investigated based on light emitting diode (LED). Results showed that *Chlorella pyrenoidosa* grew best under blue light, and the optical density, specific growth rate and biomass of *Chlorella pyrenoidosa* was about 2.4,  $0.10 \text{ d}^{-1}$  and  $0.64 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively, while the optical density of *Chlorella pyrenoidosa* was between 1.0 and 1.7, the specific growth rate was between  $0.07 \sim 0.10 \text{ d}^{-1}$  and the biomass was between  $0.27 \sim 0.38 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  under other light quality after 30 days of cultivation. Under blue light, the optical density, specific growth rate and biomass of *Chlorella pyrenoidosa* was approximately 2.05 times, 1.33 times and 2.06 times higher than red light, respectively. Moreover, red and blue mixing light was conducive to the synthesis of chlorophyll a and  $\beta$ -carotene of *Chlorella pyrenoidosa*, and blue light could promote the synthesis of chlorophyll b. Chlorophyll a and carotenoids content of *Chlorella pyrenoidosa* was  $13.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  and  $5.8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  respectively under red and blue mixing light with a ratio of 8:1, while it was  $8.4 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  and  $3.6 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  respectively under blue light. Red and blue mixing light was more conducive to protein and total lipid content per dry cell of *Chlorella pyrenoidosa*. Protein and total lipid content was  $489.3 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  and  $311.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  under red and blue mixing light with a ratio of 8:3, while it was  $400.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  and  $231.9 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  respectively under blue light.

**Key words:** *Chlorella pyrenoidosa*; light emitting diode(LED); light quality; growth characteristics; red and blue mixing light

光照是影响微藻细胞生长及生化成分变化最重要的环境因子之一,它对微藻的生长代谢、光合作用、藻体颜色、细胞形态建成及代谢产物积累均有重要的影响<sup>[1,2]</sup>. 自然界中光照的变化具有一定规律性和稳定性,微藻在长期进化过程中形成了对光照反应的特异性. 因此,研究光照作用及应用适当的光照技术培养微藻,加快其生长繁殖,调节其营养成分,是提高其产量和质量的重要途径<sup>[3~5]</sup>. 光照作为一个复杂的生态因子,其对微藻生长的作用因素主要包括光质、光强和光周期<sup>[6~8]</sup>. 由于光强和

光周期的调节较容易实现,以往研究光环境对微藻生长的调节作用,偏重于光强和光周期. 而对于传统的生态照明光源,其比较难以实现合适配比的混光,因此光质对微藻生长及代谢的影响研究主要以单色光的影响为主<sup>[1~6]</sup>.

目前用于微藻培养的光源有荧光灯、水银灯和

收稿日期: 2014-04-26; 修订日期: 2014-06-28

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y5100365)

作者简介: 唐青青(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生物与生态修复技术,E-mail:245197886@qq.com

\* 通讯联系人,E-mail:zhgfang77@zjgsu.edu.cn

卤钨灯等,并主要以荧光灯为主<sup>[9,10]</sup>。荧光灯作为日常照明,无论从光谱结构还是从发光效率上看都是比较理想的选择,但是其发射光谱与水生生物的选择性吸收光谱不匹配,针对性差、光效低、能耗大、大量发热影响水温,故将其作为生态照明光源用于微藻的培养还存在很大的局限性。近年来,发光二极管(light emitting diode, LED)作为一种新型冷光源因具有电源电压低、耗电少、投光远、工作温度范围宽、机械强度高、节能高效、稳定性强、多色、窄带、直流、显色性好、安全、环保、高亮度、低能耗、长寿命、体积小、发热少、响应快、无频闪、无污染、无辐射、无故障等优点<sup>[11]</sup>,已经在生态照明领域展现出非常广阔的应用前景<sup>[12,13]</sup>。此外,LED具有冷却负荷低、电光转换效率高、可设特定波长的光质等特点,光源发热量小,且LED光源光质纯,可按需获得纯正单色光与复合光谱,对微藻培养是一种非常适合的人工光源<sup>[13-15]</sup>。到目前为止,LED光源的应用研究多以组培苗为主,且应用研究主要集中于单色光对植物生长发育的影响,而用于改进微藻培养方面研究的生态光源主要以荧光灯为主,基于LED光源不同配比混光对微藻细胞培养特征影响的研究报道较少<sup>[1-6]</sup>。因此,本研究以LED光源为基础,分析了单色光 and 不同配比混光对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响,以期LED光源在微藻培养中的广泛应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料与培养基

#### 1.1.1 实验藻种

选择蛋白核小球藻(FACHB-9)为实验藻种,购于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库。

#### 1.1.2 培养基

蛋白核小球藻培养采用SE培养基,具体配方参考文献[16]。

### 1.2 培养方法

将培养至对数生长期的藻种转接到装有150 mL新鲜无菌培养基的三角瓶中(250 mL),使初始 $D_{680}$ 约为0.1,并用灭菌的多层纱布进行封口包扎。LED光质条件(红蓝光不同配比)分别设置为红光:蓝光8:1、红光:蓝光8:2、红光:蓝光8:3、蓝光(463 nm)、红光(620 nm)和白光,培养温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,光照强度均为 $100 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,光暗周期为12 h/12 h,每个处理设置3个重复,相同的 $\text{CO}_2$

条件下,采用一次性培养,研究不同光质对蛋白核小球藻的生长特征和生化组成的影响,接种培养30 d后对蛋白核小球藻生长特征和生化组成的指标进行测定。实验所用LED灯具均由杭州汉徽光电科技有限公司提供。

### 1.3 测定指标与测定方法

#### 1.3.1 微藻细胞生长测定

每隔24 h取样一次,用紫外可见分光光度计测定藻液在680 nm处的光密度值,用 $D_{680}$ 的变化表征微藻细胞的生长情况<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.2 比生长速率

在蛋白核小球藻对数生长期开始和结束分别选取两个时间点 $t_1$ 和 $t_2$ ,分别测定藻细胞在680 nm处的光密度值,其比生长速率通过公式 $\mu = (\ln X_2 - \ln X_1)/(t_2 - t_1)$ 进行计算,式中, $\mu$ 为比生长速率( $\text{d}^{-1}$ ), $X_1$ 和 $X_2$ 分别为实验开始和结束时的 $D_{680}$ 值<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.3 微藻生物量测定

在生长末期,取一定体积的藻液,10 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,收集藻细胞,双蒸水洗涤2次后10 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心5 min,收获新鲜藻体,将藻体烘干,称重,通过公式(生物量 = 烘干藻体重量/藻液体积)计算生物量。

#### 1.3.4 叶绿素含量测定

离心收获体积为20 mL的藻类细胞,加入90%丙酮,在4 $^\circ\text{C}$ 黑暗条件下抽提12 h,分别于630 nm和664 nm处测定光密度值,通过公式计算出叶绿素含量<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.5 $\beta$ -胡萝卜素含量测定

离心收获体积为20 mL的微藻细胞,加入90%丙酮,在4 $^\circ\text{C}$ 黑暗条件下抽提12 h,于450 nm处测定光密度值,通过公式计算出 $\beta$ -胡萝卜素含量<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.6 藻蛋白含量测定

分别测定藻液中总氮含量及离心(10 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,5 min)后上清液中总氮含量,两者之差为藻体的含氮量,藻体含氮量的6.27倍即为藻体内蛋白含量<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.7 总脂含量测定

参照胡章喜等<sup>[17]</sup>的干重法。称取一定量干藻粉用蒸馏水悬浮,加入6 mL甲醇/氯仿混合液(2:1,体积分数)振荡2 h,离心,将氯仿层转移至预先称重的螺口试管中,60 $^\circ\text{C}$ 下用氮气将氯仿吹干,称重。螺口试管前后质量之差即为总脂质量,按照以下公式计算藻粉中总脂所占质量分数( $\omega$ ): $\omega = (\text{总}$

脂质量/藻粉质量) × 100%.

#### 1.4 统计方法

本研究的数据处理和图表制作采用 Excel 2010 进行,统计分析采用 SPSS 19.0 进行.

## 2 结果与分析

### 2.1 光质对蛋白核小球藻生长特征的影响

#### 2.1.1 不同光质蛋白核小球藻的生长曲线

蛋白核小球藻接种之后在不同光质下的生长曲线如图 1. 接种后的前 15 d,藻细胞处在迟滞生长期,增长速度缓慢,不同光质藻细胞光密度没有显著差异. 接种 20 d 后,藻细胞进入对数生长期,不同光质藻细胞光密度开始呈现明显差异,蓝光下蛋白核小球藻长势较好,并且随着培养时间的增加,蓝光下的生长优势越显著. 接种 30 d 后,蓝光下蛋白核小球藻  $D_{680}$  约为 2.4,红光下约为 1.2,其它光质条件下约在 1.0 ~ 1.7 之间.

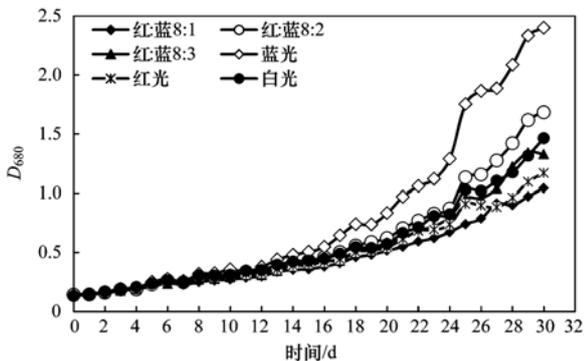


图 1 不同光质蛋白核小球藻的生长曲线  
Fig. 1 Growth curve of *Chlorella pyrenoidosa* under different light quality

#### 2.1.2 不同光质蛋白核小球藻的比生长速率

接种之后第 12 ~ 30 d,不同光质蛋白核小球藻的比生长速率在 0.07 ~ 0.10  $d^{-1}$  之间,其中蓝光下其比生长速率较高,约为 0.10  $d^{-1}$ ,红光下较低,约为 0.07  $d^{-1}$  (图 2).

#### 2.1.3 不同光质蛋白核小球藻的生物量

蛋白核小球藻接种后培养 30 d,不同光质其生物量积累的差异较大,红蓝 8:1、红蓝 8:2、红蓝 8:3、红光、白光下蛋白核小球藻生物量分别为 0.27、0.36、0.32、0.31、0.38  $g \cdot L^{-1}$ ,蓝光下蛋白核小球藻生物量最大,达到 0.64  $g \cdot L^{-1}$  (图 3),分别约为红蓝 8:1、红蓝 8:2、红蓝 8:3、红光、白光生物量的 2.4 倍、1.8 倍、2.0 倍、2.1 倍和 1.7 倍.

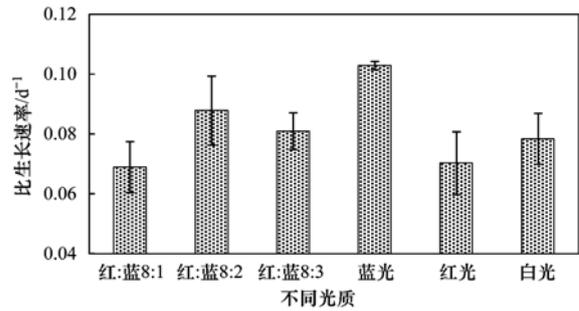


图 2 不同光质蛋白核小球藻的比生长速率  
Fig. 2 Growth rate of *Chlorella pyrenoidosa* under different light quality

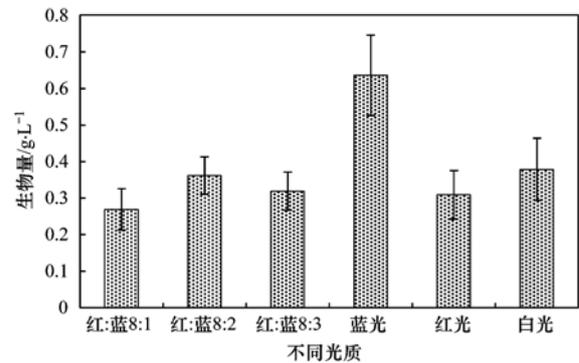


图 3 不同光质蛋白核小球藻的生物量  
Fig. 3 Biomass of *Chlorella pyrenoidosa* under different light quality

### 2.2 光质对蛋白核小球藻光合色素含量的影响

#### 2.2.1 不同光质蛋白核小球藻的叶绿素含量

蛋白核小球藻接种后在不同光质条件下培养 30 d,不同光质藻细胞内叶绿素含量变化趋势如图 4. 从中可以看出,单位细胞干重的叶绿素 a 含量蓝光最低,约为 8.4  $mg \cdot g^{-1}$ ,红蓝混光较高,红蓝 8:1、红蓝 8:2、红蓝 8:3 叶绿素 a 含量分别约为 13.5、12.8、13.2  $mg \cdot g^{-1}$ ,而红光为 11.5  $mg \cdot g^{-1}$ . 单位细胞干重的叶绿素 b 含量红光最低,约为 4.8  $mg \cdot g^{-1}$ ,其它光质没有显著差异,红蓝 8:1、红蓝 8:2、红蓝 8:3、蓝光和白光叶绿素 b 含量分别为 6.3、6.1、

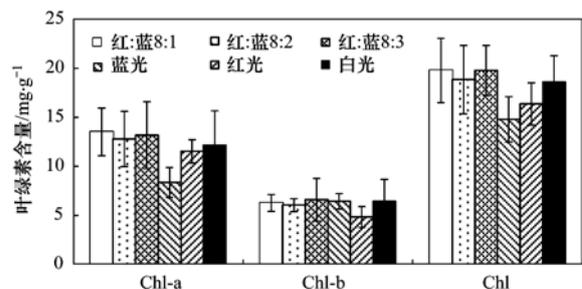


图 4 不同光质蛋白核小球藻的叶绿素含量  
Fig. 4 Chlorophyll content of *Chlorella pyrenoidosa* under different light quality

6.6、6.4 和 6.4  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。不同光质叶绿素 a + b 含量的变化趋势与叶绿素 a 的基本相同,单位细胞干重的叶绿素 a + b 含量蓝光最低,约为 14.8  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,红蓝混光较高,红蓝 8:1、红蓝 8:2、红蓝 8:3 叶绿素 a 含量分别约为 19.8、18.8、19.8  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而红光为 16.4  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

### 2.2.2 不同光质蛋白核小球藻的 $\beta$ -胡萝卜素含量

不同光质条件下  $\beta$ -胡萝卜素含量的变化规律如图 5。单位细胞干重的  $\beta$ -胡萝卜素含量蓝光最低,为 3.6  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而红蓝 8:1 和红蓝 8:3 的  $\beta$ -胡萝卜素含量分别约为 5.8  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 5.7  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,红光则为 4.9  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

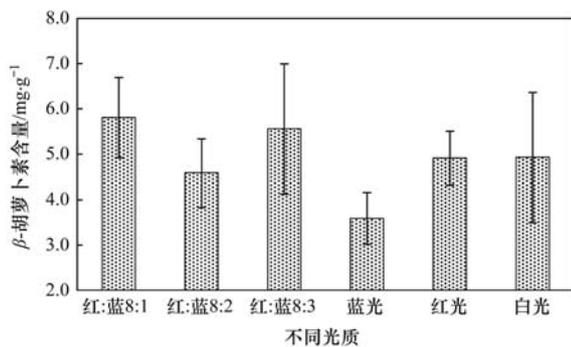


图 5 不同光质蛋白核小球藻的  $\beta$ -胡萝卜素含量

Fig. 5 The  $\beta$ -carotene content of *Chlorella pyrenoidosa* under different light quality

### 2.3 光质对蛋白核小球藻蛋白质和总脂含量的影响

#### 2.3.1 不同光质蛋白核小球藻的蛋白质含量

不同光质条件下蛋白质含量的变化规律如图 6。单位细胞干重的蛋白质含量红蓝 8:3 和白光较高,分别为 489.3  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  和 488.5  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,蓝光下蛋白质含量较低,为 400.9  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,而红光下蛋白质含量为 456.7  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

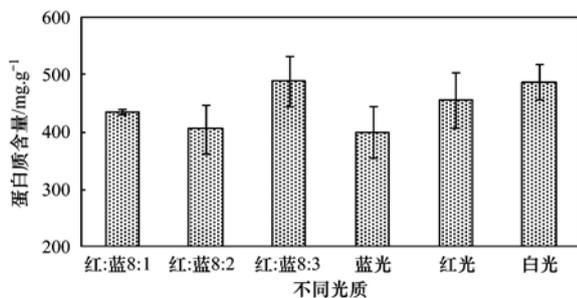


图 6 不同光质条件蛋白核小球藻的蛋白质含量

Fig. 6 Protein content of *Chlorella pyrenoidosa* under different light quality

#### 2.3.2 不同光质蛋白核小球藻的总脂含量

不同光质条件下蛋白核小球藻总脂含量的变化

规律如图 7。总脂含量红蓝 8:1 较高,为 31.1%,蓝光下较低为 23.2%,而红光下为 25.2%。

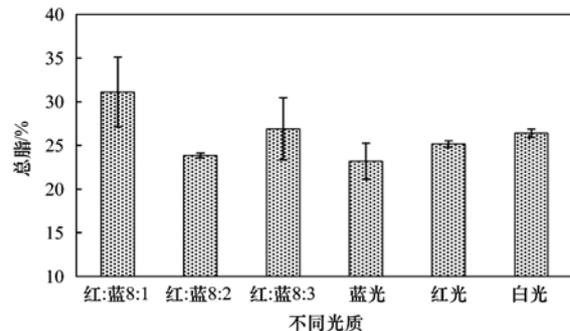


图 7 不同光质条件蛋白核小球藻的总脂含量

Fig. 7 Total lipid content of *Chlorella pyrenoidosa* under different light quality

### 3 讨论

光合作用是微藻合成细胞内物质的基本途径,微藻通过对光能的吸收、传递和转化将光能转化为自身所需的物质<sup>[18]</sup>。与高等植物相比,微藻的色素体及色素组成相对复杂,如蓝藻门色素体无质体,色素分散,含有叶绿体 a、 $\beta$ -胡萝卜素、藻蓝素、藻黄素和藻红素等多种色素;绿藻门色素体和叶绿体呈杯、环节螺旋带状、星状、网状等多种,而不同的色素体和色素组成对光质的需求不完全相同<sup>[19]</sup>。Aidar 等<sup>[3]</sup>发现微小环藻 (*Cyclotella caspia*) 在蓝-绿光下生长速率最高,而亚心形扁藻 (*Tetraselmis gracilis*) 在红光下生长较快;Wang 等<sup>[15]</sup>发现红光能够提高钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*) 比生长速率,而其在蓝光下光量子转换成生物量的效率最低;Das 等<sup>[5]</sup>研究发现蓝光能够提高微拟球藻 (*Nannochloropsis* sp.) 的比生长速率,而红光下微拟球藻的比生长速率最低;Shu 等<sup>[20]</sup>在研究中发现红光有利于小球藻 (*Chlorella* sp.) 和酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 混合培养体系生物量的积累;沈银武等<sup>[21]</sup>报道了蓝光下中华植生藻 (*Richelia sinica*) 生长缓慢;王伟<sup>[22]</sup>发现中华盒形藻在白光下的细胞日增殖率最大,蓝光次之;毛安君<sup>[13]</sup>采用单色 LED 光源和荧光灯从效率和速率两个角度研究了光源光谱对海生小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 和等鞭金藻 (*Isochrysis galbana* Parke 8701) 生长的影响,发现连续光谱能够促进最大生长率,蓝光促进生长的效率较高,两者组合能够较好地兼顾效率和速率。以上的研究结果说明,不同微藻的色素系统组成不同,其在光合作用过程中对光质的需求不同。如钝顶螺旋藻生长需要较低 [ $330 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ] 的光

强,而蓝光具有较高的光量子数和光合效率,因此红光更能促进钝顶螺旋藻的生长<sup>[23]</sup>,而红光能够高效激活原始河口底栖微藻叶绿素分子,加速其光合作用和细胞分裂速率,促进底栖微藻叶绿素等细胞内含物的积累<sup>[24]</sup>.

微藻光合器官中捕获光能主要是由光合色素完成,所以光环境(包括光质、光强和光周期)的改变对微藻光合色素形成具有重要影响<sup>[25]</sup>. 本研究发现红蓝光有利于蛋白核小球藻叶绿素 a 和  $\beta$ -胡萝卜素的合成,蓝光可促进叶绿素 b 的合成. 然而,对于中华植生藻 (*Richelia sinica*), 蓝光更有利于叶绿素 a 和  $\beta$ -胡萝卜素的合成<sup>[21]</sup>,绿光下紫球藻细胞体内的藻红素含量增加,红光下藻红素含量下降,叶绿素含量增加. 因此,微藻培养过程中光质条件的变化会引起其光合色素含量的改变. 微藻进行光合作用的能量来源主要是光合色素捕获的光能,所以光合色素含量的高低,与微藻的光合速率密切相关. 红光可在转录水平上调节捕光色素蛋白复合体(LHC)的合成,而蓝光和近紫外光对光合作用的调控,主要集中于叶绿体的分化和运动以及调节光合作用酶的活性等. 中华植生藻光合放氧与吸氧都以黄光和白光最高,而绿光、红光和蓝光下较低,代谢作用相对较弱<sup>[21]</sup>,红光对底栖藻类光合作用速率有促进作用而蓝光对藻类细胞生长有抑制和伤害作用<sup>[24]</sup>,因此微藻种类不同,其光合色素组成机构受不同光质调控的差异显著. 当环境条件(如光照条件和营养盐等)改变时,会影响到藻类光合色素和色素前体的周转和转化(比如类胡萝卜素循环),从而引起藻类光合色素的变化. 不同光质处理蛋白核小球藻出现了光合色素含量的变化,可能是由于不同光质的作用影响了细胞内光合色素的周转和转化,从而引起了藻细胞色素的降解或合成.

光质的选择对微藻细胞内物质的积累具有十分重要影响,不同光质对蛋白核小球藻蛋白质和总脂的合成积累差异显著. 本研究发现,蓝光虽然有利于蛋白核小球的生长及生物量的积累,但单位细胞干重的蛋白质和总脂含量在所有光质中都是较低的,而红蓝混光更有利于蛋白核小球藻蛋白质和总脂的积累. 王伟<sup>[22]</sup>发现蓝光能够促进中华盒形藻蛋白质的合成,而红光下碳水化合物含量增加,脂类含量在蓝光、红光下有所下降; You 等<sup>[6]</sup>研究发现红光和蓝光能促进紫球藻 (*Porphyridium cruentum*) 的光合效率和胞外多糖的积累; Korbee 等<sup>[23]</sup>在研究红黄绿蓝白等 5 种光质对红藻紫菜 (*Porphyra*

*leucosticta*) 代谢影响时发现,蓝光更加有利于其氮代谢产物的合成与积累,蓝光能促进类菌胞素氨基酸 porphyrin-334、palythine 和 asterine-330 的积累,而红黄绿白光有利于 shinorine 的积累; Shu 等<sup>[20]</sup>研究发现蓝光更加有利于小球藻和酿酒酵母混合培养体系中油脂的积累; Das 等<sup>[5]</sup>发现蓝光能够促进微拟球藻脂肪酸甲酯(FAME)的积累. 以上研究均发现不同光质条件下微藻细胞的生化组成不同,而光质对微藻细胞代谢产物合成的影响机制需要进一步进行探索和研究.

#### 4 结论

以 LED 光源为基础,研究了单色光 and 不同配比混光对蛋白核小球藻生长特征及生化组分的影响,结果发现:①蓝光能够明显有利于蛋白核小球藻的生长及促进其生物量的积累;②红蓝光有利于蛋白核小球藻叶绿素 a 和  $\beta$ -胡萝卜素的合成,而蓝光可促进叶绿素 b 的合成;③红蓝混光更有利于蛋白核小球藻蛋白质和总脂的积累,单位细胞干重的蛋白质和总脂含量蓝光条件下均较低.

#### 参考文献:

- [1] Figueroa F L, Aguilera J, Jiménez C, et al. Growth, pigment synthesis and nitrogen assimilation in the red alga *Porphyra* sp. (Bangiales, Rhodophyta) under blue and red light [J]. *Scientia Marina*, 1995, **59**(1): 9-20.
- [2] Aguilera J, Francisco J, Gordillo L, et al. Light quality effect on photosynthesis and efficiency of carbon assimilation in the red alga *Porphyra leucosticta* [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2000, **157**(1): 86-92.
- [3] Aidar E, Ganesella-Galvão S M F, Sigaud T C S, et al. Effects of light quality on growth, biochemical composition and photosynthetic production in *Cyclotella caspia* Grunow and *Tetraselmis gracilis* (Kyllin) Butcher [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1994, **180**(2): 175-187.
- [4] Kebede E, Ahlgren G. Optimum growth conditions and light utilization efficiency of *Spirulina platensis* (= *Athrospira fusiformis*) (Cyanophyta) from Lake Chitu, Ethiopia [J]. *Hydrobiologia*, 1996, **332**(2): 99-109.
- [5] Das P, Wang L, Aziz S S, et al. Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light [J]. *Bioresource Technology*, 2001, **102**(4): 3883-3887.
- [6] You T, Barnett S M. Effect of light quality on production of extracellular polysaccharides and growth rate of *Porphyridium cruentum* [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2004, **19**(3): 251-258.
- [7] 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.

- [ 8 ] Liu J H, Yuan C, Hu G R, *et al.* Effects of light intensity on the growth and lipid accumulation of microalga *Scenedesmus* sp. 11-1 under nitrogen limitation [ J ]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **166**(8): 2127-2137.
- [ 9 ] Jeon Y C, Cho C W, Yun Y S. Measurement of microalgal photosynthetic activity depending on light intensity and quality [ J ]. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **27**(2): 127-131.
- [ 10 ] Yeh K L, Chang J S, Chen W M. Effect of light supply and carbon source on cell growth and cellular composition of a newly isolated microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31 [ J ]. *Engineering in Life Sciences*, 2010, **10**(3): 201-208.
- [ 11 ] 郝洛西, 杨秀. 基于 LED 光源特性的半导体照明应用创新与发展 [ J ]. *照明工程学报*, 2012, **23**(1): 1-6.
- [ 12 ] Katsuda T, Shimahara K, Shiraishi H, *et al.* Effect of flashing light from blue light emitting diodes on cell growth and astaxanthin production of *Haematococcus pluvialis* [ J ]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006, **102**(5): 442-446.
- [ 13 ] 毛安君. LED 光源促进微藻生长的研究 [ D ]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [ 14 ] Lababpour A, Shimahara K, Hada K, *et al.* Fed-batch culture under illumination with blue light emitting diodes (LEDs) for astaxanthin production by *Haematococcus pluvialis* [ J ]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2005, **100**(3): 339-342.
- [ 15 ] Wang C Y, Fu C C, Liu Y C. Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis* [ J ]. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, **37**(1): 21-25.
- [ 16 ] 嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 等. 基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 培养研究 [ J ]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 621-628.
- [ 17 ] 胡章喜, 安民, 段舜山, 等. 不同氮源对布朗葡萄藻生长、总脂和总烃含量的影响 [ J ]. *生态学报*, 2009, **29**(6): 3288-3294.
- [ 18 ] Agrawal S C. Factors controlling induction of reproduction in algae-review; the text [ J ]. *Folia Microbiologica*, 2012, **57**(5): 387-407.
- [ 19 ] 吴吉林, 周波, 麻明友, 等. 微藻色素的研究进展 [ J ]. *食品科学*, 2012, **31**(23): 395-400.
- [ 20 ] Shu C H, Tsai C C, Liao W H, *et al.* Effects of light quality on the accumulation of oil in a mixed culture of *Chlorella* sp. and *Saccharomyces cerevisiae* [ J ]. *Journal of Chemistry Technology and Biotechnology*, 2011, **87**(5): 601-607.
- [ 21 ] 沈银武, 朱运芝, 刘永定. 不同光质对中华植生藻的影响 [ J ]. *水生生物学报*, 1999, **23**(3): 285-287.
- [ 22 ] 王伟. 光质对中华盒形藻生长及生化组成的影响 [ J ]. *武汉植物学研究*, 1999, **17**(3): 197-200.
- [ 23 ] Korbee N, Figueroa F L, Aguilera J. Effect of light quality on the accumulation of photosynthetic pigments, proteins and mycosporine-like amino acids in the red alga *Porphyra leucosticta* (Bangiales, Rhodophyta) [ J ]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2005, **80**(2): 71-78.
- [ 24 ] 庄树宏, Sven H. 光强和光质对底栖藻类群落影响 II. 群落和种群的动态和适应模式 [ J ]. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2057-2066.
- [ 25 ] 韩博平, 韩志国, 付翔. 藻类光合作用机理与模型 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2003.

## CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb .....	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility .....	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013 .....	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter .....	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM <sub>10</sub> .....	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer .....	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region .....	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds .....	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen .....	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake .....	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake .....	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet .....	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an .....	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff .....	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality .....	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process .....	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process .....	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein .....	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution .....	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor .....	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions .....	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress .....	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> .....	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration .....	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe <sup>2+</sup> and Fe <sup>3+</sup> on the Activity of ANAMMOX .....	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N <sub>2</sub> O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge .....	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique .....	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil .....	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil .....	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle .....	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils .....	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis( <i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols .....	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator .....	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales .....	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years .....	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI <sub>Ac</sub> Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity .....	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables .....	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells .....	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals .....	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char .....	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer .....	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N <sub>2</sub> O Releases from Bioreactor Landfill .....	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth .....	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta .....	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation .....	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon .....	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

# 《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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