

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪 宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚 婧,李 颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘 露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘 波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张 健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张 明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟 希,张 淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李 兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈 林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊 伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨 磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘 帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳 林,王 信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余 杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄 蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张 义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭 建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208031100

刘露, 丁柳丽, 陈伟洲, 邹定辉. 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响. 生态学报, 2013, 33(13): 3916-3924.

Liu L, Ding L L, Chen W Z, Zou D H. The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta). Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 3916-3924.

不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和 叶绿素荧光特性的影响

刘 露¹, 丁柳丽¹, 陈伟洲², 邹定辉^{1,*}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 汕头大学海洋生物研究所, 汕头 515063)

摘要: 大气 CO₂ 浓度升高对海藻的影响已有许多的研究报道, 但鲜见有关温度与 CO₂ 相互作用的研究。在 4 种条件下对坛紫菜进行连续通气培养: (1) 15 °C + 390 μmol/mol CO₂, (2) 15 °C + 700 μmol/mol CO₂, (3) 25 °C + 390 μmol/mol CO₂, (4) 25 °C + 700 μmol/mol CO₂。从而探讨这种南方海域重要栽培海藻种类的生长和叶绿素荧光特性对温度和 CO₂ 相互作用的响应。结果表明: CO₂ 对坛紫菜的生长的影响具有温度依赖性, 在低温生长条件下提高 CO₂ 浓度更有利于坛紫菜的生长。CO₂ 对坛紫菜叶绿素 a (Chlorophyll a, Chl a) 和类胡萝卜素 (Carotenoid, Car) 的促进作用远大于温度对其产生的影响。相对于 25 °C 的生长温度而言, 15 °C 生长温度下的坛紫菜表现出较高的最大相对电子传递速率 ($rETR_{max}$), 表明坛紫菜在低温环境下有较高的光合潜力; 而 CO₂ 对坛紫菜的 $rETR_{max}$ 没有明显影响。对于在不同测定温度下的光合荧光特性而言, 在 10—30 °C 测定温度范围内, 在各生长条件下的海藻的 $rETR_{max}$ 、光能利用效率 (α) 和最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 随温度的升高变化不明显; 但在较高测定温度下 (≥ 30 °C), 上述荧光参数显著下降, 说明高温易引发海藻光能利用效率和光合能力的下降, 这可能与光系统 (PS) II 反应中心活性下调有关。同时, 当测定温度大于 30 °C 时, 15 °C 生长条件下的坛紫菜的 $rETR_{max}$ 、 α 和 F_v/F_m 值下降趋势远大于 25 °C 生长条件下的坛紫菜的值, 表明在低温生长条件下的坛紫菜对短期高温胁迫的适应能力较弱; 而在高 CO₂ 浓度生长条件下的坛紫菜的 $rETR_{max}$ 总是低于正常 CO₂ 浓度生长下的值, 说明 CO₂ 浓度升高会抑制坛紫菜在短期高温条件下的光合电子传递能力。

关键词: CO₂; 温度; 坛紫菜; 生长; 叶绿素荧光; 光合作用

The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta)

LIU Lu¹, DING Liuli¹, CHEN Weizhou², ZOU Dinghui^{1,*}

1 College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China

2 Marine Biology Institute, Science Center, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China

Abstract: Atmospheric CO₂ concentration is predicted to nearly double by the end of this century. There are a large number of reports on the effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on seaweeds. However, the investigation concerning the impacts of combined effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations and temperature on seaweeds is very limited. In the present study, the red seaweed *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) was cultured under four different conditions: (1) 15 °C + 390 μmol/mol CO₂, (2) 15 °C + 700 μmol/mol CO₂, (3) 25 °C + 390 μmol/mol CO₂, (4) 25 °C + 700 μmol/mol CO₂, in order to examine the combined effects of the elevated CO₂ concentrations and temperature on growth,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41076094, 41276148)

收稿日期: 2012-08-03; 修订日期: 2013-03-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dhzhou@scut.edu.cn

some biochemical components and chlorophyll fluorescence in this commercially important species. The results indicated that the growth response of *P. haitanensis* to elevated CO₂ in seawater was temperature dependent, with the enhancement of growth resulting from elevated CO₂ being remarkable greater at lower growth temperature (15 °C) with respect to 25 °C. The CO₂ conditions in culture exerted a much pronounced influence on the contents of Chlorophyll a (Chl a) and Carotenoid (Car) than temperature did. 15 °C-grown *P. haitanensis* exhibited much higher maximum relative electron transport rate ($rETR_{max}$) in comparison with 25 °C-grown thalli, regardless of the CO₂ concentrations in culture. This indicated that *P. haitanensis* displayed a higher photosynthetic potential at low growth temperature than high growth temperature. Meanwhile, extra CO₂ in the culture had no significant impact on $rETR_{max}$ in *P. haitanensis*. The characters of chlorophyll fluorescence were determined under different measurement temperatures using Junior-PAM. The increase of measurement temperature from 10 to 30 °C made a negligible effect on $rETR_{max}$, the photosynthetic light use efficiency of electron transport (α , the initial slope of the rapid light curves) and maximum photochemical quantum yield values (F_v/F_m), regardless of the growth conditions. However, the values of $rETR_{max}$, α and F_v/F_m were reduced drastically when the measurement temperatures were above 30 °C, with the decline being much pronounced in 15 °C-grown algae than 25 °C-grown algae. Our results suggested that high temperatures (30—40 °C) in the short-term inhibited the photosynthetic capacity of *P. haitanensis*, which might be associated with the damage in photosystem II (PS II) reaction centre and a concomitant reduction of electrons transport rate. Meanwhile, 25 °C-grown algae showed a higher tolerance to high temperature stress than 15 °C-grown algae did, since 15 °C-grown algae displayed greater downtrend in the values of $rETR_{max}$, α and F_v/F_m when the measurement temperatures rose to 30 °C. The results also showed that the value of $rETR_{max}$ was lower in *P. haitanensis* thalli grown under CO₂ enriched air with respect to non-enriched air when the algae were subjected to the high temperatures, indicating that, compared to normal CO₂ growth conditions, elevated CO₂ growth conditions might repress the ability of photosynthetic electron transport of algae when subjected to short-term high temperature stress.

Key Words: CO₂; temperature; *Porphyra haitanensis*; growth; chlorophyll fluorescence; photosynthesis

大型海藻是海洋近岸海域重要的初级生产者,在生物量生产及 CO₂ 生物削减方面具有很大的潜力^[1-3]。随着大气 CO₂ 浓度持续快速的增加,海洋吸收的 CO₂ 也随之增加,导致表层海水酸化,对海洋生态系统产生非常重要的影响^[4-6]。近年来,关于大气 CO₂ 浓度增高与大型海藻的研究越来越多,已研究,在较高无机碳浓度下,条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)^[7]、江蓠(*Gracilaria* sp.)^[8]的光合能力(光饱和或碳饱和条件下的光合速率)增高,石莼(*Ulva lactuca*)^[9]、龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)^[10]的光合能力下降或没有明显改变。由此可见,大型海藻对高浓度 CO₂ 的响应机制不同,并且在不同种属之间存在很大的差异。自然环境条件下,不同海藻的栖息环境有着很大差别。一般来讲,生长在潮间带的海藻始终处于生态因子剧烈变化中,其中温度的变化尤为突出。温度是影响生物过程的最普遍的气候因素,对海藻的生长、代谢、生化组成以及碳平衡等方面产生重要影响。特别是,在大气 CO₂ 浓度急剧升高、以及伴随着的全球变暖背景下,全球气候事件(如反常温度波动)发生频率与强度也显著增大^[6]。目前,关于大型海藻在不同温度及其他环境因子条件下的生理生态学方面的已有较多的研究报道^[11-12]。然而对于 CO₂ 浓度升高和温度的相互作用对大型海藻的影响的研究则很少。本文采用叶绿素荧光分析技术从光合作用角度研究 CO₂ 和温度两种生态因子对坛紫菜的生长和光合生理特征的影响,从而为评估在气候变化背景下坛紫菜的生理生态响应特征提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 材料

坛紫菜(*Porphyra haitanensis*)主要生长在浅海潮间带的岩石上,隶属红藻门、紫菜目、红毛菜科,是我国南方海域(福建、浙江和广东等)海水养殖的主要经济海藻。它能够吸收海水中大量存在的 HCO₃⁻ 作为其光合作用的主要无机碳^[13]。实验所用的材料采自汕头南澳岛深澳海藻养殖基地。采集时选择新鲜、健康、形状一

致的叶状体(约 5—8 cm),洗净表面附着的杂藻和底泥,放入盛有少量海水的塑料袋中,用低温箱运至实验室暂养。暂养条件是温度为 20 °C,光照强度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光照周期为 12 h:12 h(光周期为 9:00—21:00);培养液为过滤的自然海水,并添加营养盐 $100 \mu\text{mol/L NaNO}_3$, $20 \mu\text{mol/L NaH}_2\text{PO}_4$ (最终浓度)。暂养期间每两天更换一次新鲜培养液,每天 24 h 通气。海藻在暂养 3—4 d 后用于以下的实验培养处理。

1.2 实验处理

在 4 种生长条件下培养坛紫菜:(1) 15 °C + $390 \mu\text{mol/mol CO}_2$, (2) 15 °C + $700 \mu\text{mol/mol CO}_2$, (3) 25 °C + $390 \mu\text{mol/mol CO}_2$, (4) 25 °C + $700 \mu\text{mol/mol CO}_2$ 。每种处理设 3 个重复。将约 2 g 的藻体盛入装有 3 L 天然过滤海水的锥形烧瓶中(共计 12 个)。将其中的 6 个烧瓶放入温度设定为 15 °C 的 CO_2 植物培养箱(武汉瑞华)中,其中 3 个通自然空气,另外 3 个通 $700 \mu\text{mol/mol CO}_2$ 。25 °C 亦同。每个烧瓶的曝气量要适中且相同,使得海藻在烧瓶中轻轻移动。其他实验条件如营养盐浓度、光照强度和光照周期等都与上述暂养处理相同。坛紫菜在连续培养一个星期后进行相关实验测定。

1.3 海水 pH 值的测定

为了检测培养期中海水 pH 值的变化情况,定时(白天每隔 3 h 测定 1 次,晚上每隔 4 h 测定 1 次)对海水取样,以测定其 pH 值。海水 pH 值的测定采用 pH510(EUTECH)计。本实验连续测定了海水 33 h(即约 2 个光周期、1 个暗期)内 pH 值的变化情况。

1.4 相对生长速率的测定

在坛紫菜培养期间,定期监测生物量(鲜重)的变化,计算相对生长速率(RGR)按照以下公式求得^[10]:

$$RGR(\%/d) = 100\% \times (\ln M_t - \ln M_0) / t$$

式中, M_t 为第 t 天藻体的重量(g), M_0 为藻体的初始重量(g),藻样称量前用吸水纸吸干。

1.5 色素的测定

参照 Jensen^[14]的方法,测定藻体内叶绿素 a(Chl a)和类胡萝卜素(Car)的含量。称取约 0.2 g 海藻,剪碎,用 100% 丙酮进行研磨,将滤液转入具塞试管中,使得最终所加丙酮总体积为 15 mL,放入 4 °C 冰箱中静置 24 h 后离心(5000 r, 20 °C, 15 min)。取上清液用紫外可见分光光度计(UV1800, 日本)测定其在 450、666、730 nm 处的吸光值,根据 Jensen^[14]提供的公式计算色素的含量。

1.6 叶绿素荧光动力学参数的测定

坛紫菜叶绿素荧光动力学特性采用叶绿素荧光仪(Junior-PAM, Walz, 德国)参照 Schreiber^[15]的方法进行测定。将 4 种生长条件下的藻体放在温度分别为 10、15、20、25、30、35、40 °C(为了与实验培养的生长温度区分,以下称此温度为实验测定温度)培养箱中对应海水(此处的海水是已达到测定温度和与生长 CO_2 浓度空气平衡的海水)的三角烧瓶中适应 15 min(例如 15 °C + $390 \mu\text{mol/mol CO}_2$ 生长下的坛紫菜分别放入 10、15、20、25、30、35、40 °C + $390 \mu\text{mol/mol CO}_2$ 已达平衡的海水中,其他亦同),光强和通气条件同实验处理相同,以分析坛紫菜叶绿素荧光动力学特性如何随短期温度变化而变化。用测量光(约 $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)和饱和脉冲(约 $10000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)测定藻体的最大光化学量子产量(F_v/F_m)。快速光曲线(RLCs)的测定是由电脑控制完成,为样品依次提供从 0 至 $820 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 共 8 个梯度的光化光,待不同光强下荧光值达到稳定后(约 10 s),提供 0.6 s 约 $10000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的饱和脉冲光以测得该光强下最大荧光值。光合参数计算公式为:①藻体的最大光化学量子产量(F_v/F_m), $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$;②相对电子传递速率($rETR$), $rETR = Y \times PAR \times 0.5 \times 0.84$ ^[15], 式中 Y 是指实际量子产量, PAR 指光合有效辐射, 0.5 指 PS II 吸收的光量子所占比例(因为一个电子传递需要吸收 2 个量子,假定光能由两个光系统平均分配), 0.84 指样品的吸光系数(即光合色素吸收光量子的比例);③最大相对电子传递速率($rETR_{\max}$)通过拟合公式计算得出, 其中 $rETR = rETR_{\max} \times \tanh(\alpha \times I / rETR_{\max})$ ^[16], 式中 α 为快速光曲线初始斜率(反应了光合器官对光能的利用效率); I 为即时光强。每个处理重复测定 6 次。

1.7 统计与分析

试验数据采用 Excel 2007、Origin 7.0 统计软件进行数据处理及统计分析。用 One-way ANOVA 或者 *T*-test 进行分析,以 $P < 0.05$ 为显著水平。

2 结果

2.1 培养液中 pH 值的变化

图 1 显示坛紫菜培养液 pH 值日变化曲线。对于 4 种处理,海水中 pH 值在光周期中逐渐上升达到最高值,而在暗周期迅速下降到最低值,进入下一个光周期 pH 值又开始出现上升趋势。同时,从图 1 中还可以看出,通高 CO₂ 浓度的培养液中 pH 值总是低于通正常空气处理培养液中的 pH 值。

2.2 相对生长速率的变化

在实验室培养期间,在不同条件培养下的坛紫菜的生物量总体上呈现增长的趋势。从图 2 可以看出,在 15 °C 条件下生长的海藻,CO₂ 浓度升高显著增加海藻的 *RGR* ($P < 0.05$);而 25 °C 下生长的坛紫菜,增加 CO₂ 浓度,海藻的 *RGR* 虽略有提高,但不显著 ($P > 0.05$)。同时,无论在任何通气方式下,相对于高温 (25 °C),低温 (15 °C) 生长条件下的海藻表现出高的 *RGR* ($P > 0.01$)。

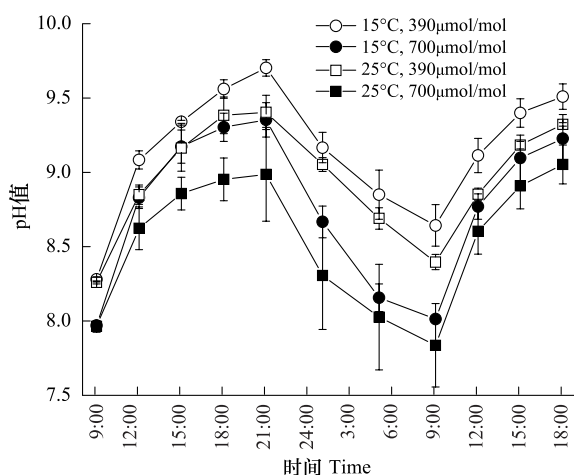


图 1 在不同生长条件下的坛紫菜培养液 pH 值的日变化

Fig.1 The diurnal changes of pH values in the seawater media for *Porphyra haitanensis* cultured at regular (390 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂) and CO₂-enriched (700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂) air, and at 15 °C and 25 °C

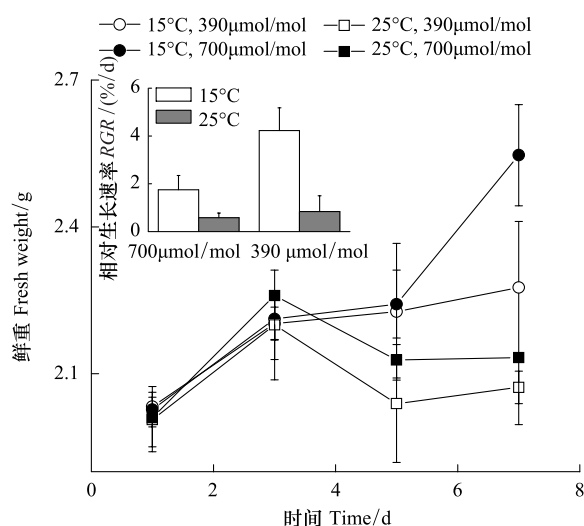


图 2 在不同生长条件下的坛紫菜生物量的变化及相对生长速率

Fig.2 The change of biomass and the relative growth rate (*RGR*) of *Porphyra haitanensis* cultured at regular (390 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂) and CO₂-enriched (700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂) air, and at 15 °C and 25 °C

2.3 色素的变化

在 15 °C 和 25 °C 两种生长温度条件下,CO₂ 浓度增加分别使藻体内的 Chl a 的含量提高了 58.8% 和 13.7%,Car 的含量增加了 45.0% 和 23.0%。而在相同 CO₂ 浓度培养条件下,生长温度的改变对藻体中 Chl a 和 Car 的含量的影响不显著 ($P > 0.05$) (表 1)。

2.4 荧光参数的变化

坛紫菜的 RLCs 在低光强范围内,随着光照强度的上升,藻的 *rETR* 快速上升,当光强到达一定值后 (大于 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),*rETR* 最终达到平稳状态 (图 3)。由图 3 可以看出,15 °C 生长条件下海藻的 *rETR*_{max} 值要明显高于 25 °C 生长的海藻的值 ($P < 0.01$);而相对于无论在何种生长温度下的海藻而言,CO₂ 浓度增加对坛紫菜的 *rETR*_{max} 没有明显的影响 ($P > 0.05$)。另一方面,生长温度和 CO₂ 对坛紫菜的 α 和 F_v/F_m 都没有显著

的影响 ($P>0.05$) (图 3)。

表 1 在不同生长条件下的坛紫菜叶绿素 a 和类胡萝卜素的含量

Table 1 Chlorophyll a (Chl a) and Carotenoid (Car) contents of *Porphyra haitanensis* cultured at regular (390 $\mu\text{mol/mol}$ CO_2) and CO_2 -enriched (700 $\mu\text{mol/mol}$ CO_2) air, and at 15 $^{\circ}\text{C}$ and 25 $^{\circ}\text{C}$

	空气培养 Under ambient CO_2 condition		高 CO_2 Under elevated CO_2 condition	
	15 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$	15 $^{\circ}\text{C}$	25 $^{\circ}\text{C}$
叶绿素 a Chl a/(mg/g 鲜重)	0.480 $\pm$ 0.033	0.590 $\pm$ 0.189	0.763 $\pm$ 0.137	0.671 $\pm$ 0.142
类胡萝卜素 Car/(mg/g 鲜重)	0.225 $\pm$ 0.011	0.274 $\pm$ 0.075	0.327 $\pm$ 0.060	0.337 $\pm$ 0.049

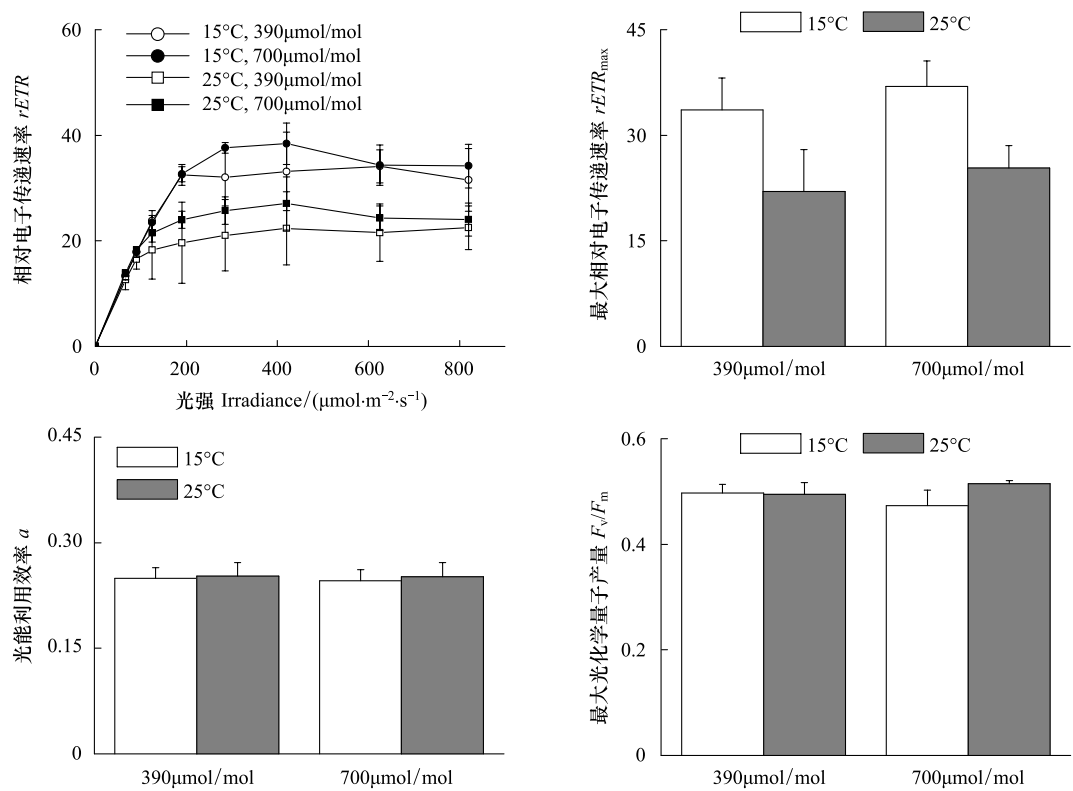


图 3 在原位温度测定下(即测定温度与生长温度一致)坛紫菜的快速光曲线(RLCs)及其有关参数

Fig. 3 The rapid light curves (RLCs) and related parameters in *Porphyra haitanensis* cultured at regular (390 $\mu\text{mol/mol}$ CO_2) and CO_2 -enriched (700 $\mu\text{mol/mol}$ CO_2) air, and at 15 $^{\circ}\text{C}$ and 25 $^{\circ}\text{C}$. The RLCs were measured at situ-temperatures (i. e. the measurement temperatures were the same as growth temperatures)

由图 4 可知,坛紫菜的 α 和 F_v/F_m 值在 10—30 $^{\circ}\text{C}$ 的测定温度范围内均没有明显变化 ($P>0.05$);当测定温度大于 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,藻体的 α 和 F_v/F_m 值都随着测定温度的升高而下降;同时还可看出,15 $^{\circ}\text{C}$ 生长条件下的海藻比 25 $^{\circ}\text{C}$ 生长条件下的海藻下降速度更快。对于在不同测定温度下海藻的 $rETR_{\text{max}}$ 值而言,当测定温度小于 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,低温生长条件下的海藻表现出较高的 $rETR_{\text{max}}$ 值;当测定温度大于等于 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,两种生长温度下藻体的 $rETR_{\text{max}}$ 值都出现下降趋势,并且相对于 25 $^{\circ}\text{C}$ 生长条件下的海藻,15 $^{\circ}\text{C}$ 生长条件下的海藻下降趋势更为显著 ($P<0.05$)。另一方面,不同 CO_2 浓度生长条件对坛紫菜在不同测定温度下的 α 和 F_v/F_m 值没有明显影响 ($P>0.05$);而对于不同测定温度下坛紫菜的 $rETR_{\text{max}}$ 值而言,在较低测定温度下(10—30 $^{\circ}\text{C}$),不同 CO_2 浓度生长条件下的海藻的 $rETR_{\text{max}}$ 值变化差别较小,在较高测定温度下(30—40 $^{\circ}\text{C}$),高 CO_2 浓度生长条件下的藻体的 $rETR_{\text{max}}$ 值总是低于正常 CO_2 浓度生长条件下的藻体的值。

3 讨论

由于海藻的生命活动(主要是光合无机碳利用以及呼吸作用)和不断向海水中通气,使得培养液 pH 值发

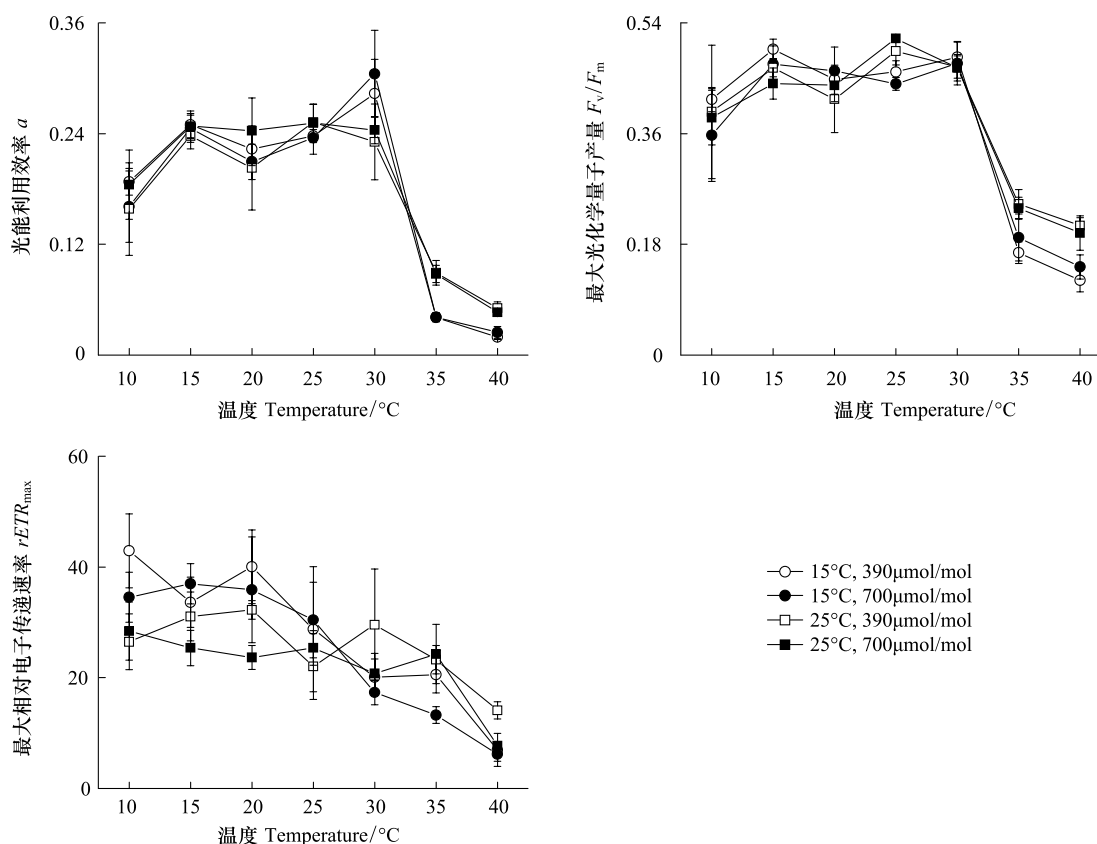


图4 在不同测定温度下的坛紫菜最大光化学量子产量(F_v/F_m)、光能利用效率(α)和相对最大电子传递速率($rETR_{max}$)的变化

Fig. 4 The changes of the maximum photochemical quantum yield (F_v/F_m), light use efficiencies (α) and maximum relative electron transport rate ($rETR_{max}$) values with measurement temperature in *Porphyra haitanensis* cultured at regular (390 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂) and CO₂-enriched (700 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂) air, and at 15 °C and 25 °C

生周期性的变化。邹定辉等^[13]表明,坛紫菜具有利用 HCO₃⁻ 作为光合作用的外在碳源的能力。通常情况下,空气中 CO₂ 向海水中的溶解速率远远小于植物进行光合作用从海水中吸收无机碳的速率^[17]。本实验结果进一步验证了这一点,主要表现在坛紫菜 pH 值日变化曲线(见图1)。光周期时,坛紫菜进行光合作用,通过 CA 酶催化利用 HCO₃⁻ 并产生 OH⁻,培养液 pH 值上升;暗周期,坛紫菜进行呼吸作用产生 CO₂,加上不断的通气作用,培养液 pH 值下降。本实验培养海水中 pH 值日变化情况与 Gao 等^[7]在条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*)、Zou^[18]在羊栖菜(*Hizikia fusiformis*)、Zou 和 Gao^[10]在龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)等的实验中海藻培养液中 pH 值变化结果相似。

生长是海藻各种生理特征的综合体现。以往研究表明,高浓度的 CO₂ 能促进一些海藻的生长^[19-20],这主要是由于光合固碳量的增加或者培养液中 CO₂/O₂ 比例增加导致暗呼吸速率降低所致;也会对一些海藻的生长产生抑制作用^[21-23],这可能是由于 CO₂ 浓度增加会引起培养液的酸化,进而导致海藻的生长速率的降低。这表明大型海藻的生长对高浓度 CO₂ 的反应在不同种类之间有很大差异,即海藻对 CO₂ 浓度增加生理效应(可能的促进作用)与培养液海水酸化生理效应(可能的抑制作用)之间的平衡,与其独特的生理特性(即不同海藻种类具有不同的生理特性)相关。本研究结果表明 CO₂ 浓度增高对坛紫菜的生长的促进作用在低温条件下尤为显著。在自然环境条件下,海藻总是生长在不断变化的环境中,在研究 CO₂ 浓度增加对海藻生长产生的影响的同时,必须考虑到其他环境条件(如光照、温度等)的协同效应,这种考虑具有更大的生态学意义。因此,对于 CO₂ 浓度增加(及其介导的海水酸化)与其他重要海洋环境因子相互作用对海藻生长或生物量积累的研究有待于在更多的藻类中进行。

光合色素是藻类植物吸收光能的主要物质,也是进行光保护的重要成分之一。以往研究结果表明高 CO_2 浓度使得 Chl a 的含量下降或者对其无影响^[10,21-22]。大量研究表明大型海藻能够自我调控藻体内色素的含量或海藻的形态来适应环境因子的改变^[24-25]。本研究结果表明 CO_2 加富使得海藻中 Chl a 和 Car 的含量显著增加,这与 Zou 等^[26]中在低光条件下 Chl a 含量增加的研究结果相似。这种改变可能是海藻为了适应环境因子改变而做出的生理调节。

叶绿素荧光动力学技术在测定叶片光合作用过程中对光能的吸收、传递、耗散、分配等方面具有独特的作用^[15]。植物相对电子传递速率表示植物吸收的光能沿光合电子传递链被传递利用了多少,可以在相当程度上反映植物的光合能力^[16]。本文结果表明,在 15 °C 生长下的坛紫菜表现出较高的 $rETR_{\max}$ (图 3),说明坛紫菜适于在低温环境下生长,这与坛紫菜的较低的温度生长季节相契合。这与 Zhang 等^[27]对条斑紫菜的不同株系中 sulian 和 WT 品系的研究结果类似。另一方面,无论在何种生长温度条件下, CO_2 浓度增加对坛紫菜的 $rETR_{\max}$ 没有显著的影响。 F_v/F_m 表示 PS II 最大光量子产量,非胁迫条件下该参数的变化极小,不受物种和生长条件的影响,胁迫条件下该参数明显下降^[28]。张玉荣等^[29]通过对铜藻幼苗在不同温度条件下的 F_v/F_m 测定得出,当温度超过 28 °C 时,铜藻幼苗的 F_v/F_m 值会显著下降。本研究结果表明,在 10—30 °C 测定温度下,海藻的 $rETR_{\max}$ 、 α 和 F_v/F_m 值变化不明显,这说明在较低以及适度的短期温度变化情况下,坛紫菜的光合活性受到的影响较小,藻体处于较为稳定的生理状态。但当测定温度升高 (≥ 30 °C) 时,两种生长温度下的海藻 $rETR_{\max}$ 、 α 和 F_v/F_m 都会随着温度的升高急剧下降,这说明藻体受到了严重的高温胁迫。这可能是海藻 PS II 反应中心受到了损伤,影响了电子传递速率,导致光合能力急剧下降^[30-31]。说明短期的高温环境的变动对于坛紫菜的光合响应有负面的影响,同时也表明坛紫菜对于环境短期的温度波动(例如:温度日变化)适应性较弱,藻体通过非光化学淬灭途径来耗散过剩的光能的能力可能受到限制或者已经丧失。Berry 和 Björkman^[32]表明在高温条件下生长的植物能够提高自身的耐热性能。Zhang 等^[27]研究表明不同株系的条斑紫菜对环境温度的适应性也不相同。本文结果表明了低温条件下生长的坛紫菜的 $rETR_{\max}$ 、 α 和 F_v/F_m 值下降趋势明显大于高温条件下生长的海藻的值,这说明了在 25 °C 生长条件下的坛紫菜要比在 15 °C 生长条件下的海藻更耐高温。这可能由于长期生长在较高温度的海藻形成了相关的逆境适应机制,其 PS II 反应中心能够维持较高用于电子传递的能量分配,从而保证了 PS II 电子传递活性。由此可知,对坛紫菜的高温生长处理可以提升其对短期高温的适应能力。这与 Franklin^[33]和张涛等^[34]研究结果相似,高光强处理提升了紫菜叶状体对高光强的适应能力。另外,Jeffrey 等^[35]报道温度胁迫对高等植物产生的影响,在高 CO_2 浓度条件下表现的尤为显著,而本文结果表明不同 CO_2 浓度生长条件下的坛紫菜在较低温度下 (< 30 °C) 的 $rETR_{\max}$ 差异不大;但在较高测定温度下 (≥ 30 °C),高 CO_2 浓度生长条件下的藻体的 $rETR_{\max}$ 值总是低于正常 CO_2 浓度生长条件下的藻体的值。这表明 CO_2 浓度升高会抑制海藻在短期高温条件下的光合电子传递能力,这与高等植物对环境因子的改变所作出的光合响应相似。

总之,本实验结果表明,坛紫菜的生长和叶绿素荧光特性会受到 CO_2 和温度相互作用的影响。在低温环境下,提高 CO_2 浓度更有利于海藻的生长;而对在不同温度下坛紫菜光合荧光特性的测定表明,在较高测定温度下 (≥ 30 °C),坛紫菜的光合能力会受到严重限制,同时,较低温度下 (15 °C) 生长的藻体其光合功能对环境高温的耐受性能较弱。另一方面,当测定温度超过 30 °C 时,提高 CO_2 浓度会降低坛紫菜在短期高温条件下的光合电子传递能力,使得其对短期高温胁迫的耐受能力受到抑制。本文通过测定不同温度 (10—40 °C) 对坛紫菜叶绿素荧光特性的影响,从而评价短期的温度改变对不同温度和 CO_2 浓度生长条件下的大型海藻的影响,这为探索海藻面临全球气候变化(温度反常波动和大气 CO_2 浓度升高)的响应提供重要的科学数据。

References:

- [1] Gao K S, McKinley K R. Use of macroalgae for marine biomass production and CO_2 remediation: a review. *Journal of Applied Phycology*, 1994, 6 (1): 45-60.

- [2] Zhang J H, Fang J G, Tang Q S. The contribution of shellfish and seaweed mariculture in China to the carbon cycle of coastal ecosystem. *Advances in Earth Sciences*, 2005, 20(3): 359-365.
- [3] Song J M, Li X G, Yuan H M, Zheng G X, Yang Y F. Carbon fixed by phytoplankton and cultured algae in China coastal seas. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 551-558.
- [4] Solomon S, Qin D, Manning M, Marquis M, Averyt K, Tignor M B, Miller H L, Chen Z L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 996-996.
- [5] Doney S C, Fabry V J, Feely R A, Kleypas J A. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1(1): 169-192.
- [6] Ramanathan V, Feng Y. On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system; Formidable challenges ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(38): 14245-14250.
- [7] Gao K S, Aruga Y, Asada K, Ishihara T, Akano T, Kiyohara M. Enhanced growth of the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda in high CO₂ concentrations. *Journal of Applied Phycology*, 1991, 3(4): 355-362.
- [8] Andria J R, Vergara J J, Perez-Llorens J L. Biochemical responses and photosynthetic performance of *Gracilaria* sp. (Rhodophyta) from Cadiz, Spain, cultured under different inorganic carbon and nitrogen levels. *European Journal of Phycology*, 1999, 34(5): 497-504.
- [9] Zou D H, Gao K S, Ruan Z X. Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthesis and nutrients uptake of *Ulva lactuca*. *Periodical of Ocean University of China*, 2001, 31(6): 877-882.
- [10] Zou D H, Gao K S. Effects of elevated CO₂ on the red seaweed *Gracilaria lemaneiformis* (Gigartinales, Rhodophyta) grown at different irradiance levels. *Phycologia*, 2009, 48(6): 510-517.
- [11] Jiang H B, Tian X L, Dong S L, Bao J. Effects of temperature and light intensity on the growth and biochemical composition of *Sargassum thunbergii*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 185-189.
- [12] Pan G H, Gao S, Wang G C, Xie X J. Effects of temperature and light on photosynthesis of *Ulva pertusa*. *Marine Sciences*, 2011, 35(9): 14-17.
- [13] Zou D H, Gao K S. Photosynthetic bicarbonate utilization in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta). *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(19): 1629-1633.
- [14] Jensen A. Chlorophylls and carotenoids // Hellebust J A, Craigie J S, eds. *Handbook of Phycological Methods: Physiological and Biochemical Methods*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1978: 59-70.
- [15] Schreiber U. Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method; an overview // Papageorgiou G C, Govindjee, eds. *Chlorophyll A Fluorescence: A Signature of Photosynthesis*. Berlin: Springer, 2004: 279-319.
- [16] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity. *Aquatic Botany*, 2005, 82(3): 222-237.
- [17] Falkowski P G, Raven J A. *Aquatic Photosynthesis*. Massachusetts: Blackwell Science, 1997.
- [18] Zou D H. Effects of elevated atmospheric CO₂ on growth, photosynthesis and nitrogen metabolism in the economic brown seaweed, *Hizikia fusiforme* (Sargassaceae, Phaeophyta). *Aquaculture*, 2005, 250(3/4): 726-735.
- [19] Gordillo F J L, Niell F X, Figueroa F L. Non-photosynthetic enhancement of growth by high CO₂ level in the nitrophilic seaweed *Ulva rigida* C. Agardh (Chlorophyta). *Planta*, 2001, 213(1): 64-70.
- [20] Gordillo F J L, Figueroa F L, Niell F X. Photon- and carbon-use efficiency in *Ulva rigida* at different CO₂ and N levels. *Planta*, 2003, 218(2): 315-322.
- [21] Mercado J M, Javier F, Gordillo L, Niell F X, Figueroa F L. Effects of different levels of CO₂ on photosynthesis and cell components of the red alga *Porphyra leucosticta*. *Journal of Applied Phycology*, 1999, 11(5): 455-461.
- [22] Zhang X, Zou D H, Xu Z G, Liu S X. Effects of increased atmospheric CO₂ and N supply on some physiological and biochemical traits in the economic brown seaweed, *Hizikia fusiformis* (Sargassaceae, Phaeophyta). *South China Fisheries Science*, 2007, 3(3): 35-40.
- [23] Israel A, Katz S, Dubinsky Z, Merrill J E, Friedlander M. Photosynthetic inorganic carbon utilization and growth of *Porphyra linearis* (Rhodophyta). *Journal of Applied Phycology*, 1999, 11(5): 447-453.
- [24] Henley W J, Dunton K H. Effects of nitrogen supply and continuous darkness on growth and photosynthesis of the arctic kelp *Laminaria solidungula*. *Limnology Oceanography*, 1997, 42(2): 209-216.
- [25] Miller S M, Wing S R, Hurd C L. Photoacclimation of *Ecklonia radiata* (Laminariales, Heterokontophyta) in Doubtful Sound, Fjordland, Southern New Zealand. *Phycologia*, 2006, 45(1): 44-52.
- [26] Zou D H, Gao K S. Photosynthetic acclimation to different light levels in the brown marine macroalga, *Hizikia fusiformis* (Sargassaceae, Phaeophyta). *Journal of Applied Phycology*, 2010, 22(4): 395-404.
- [27] Zhang T, Shen Z G, Xu P, Zhu J Y, Lu Q Q, Shen Y, Wang Y, Yao C, Li J, Wang Y, Jiang H. Analysis of photosynthetic pigments and

- chlorophyll fluorescence characteristics of different strains of *Porphyra yezoensis*. Journal of Applied Phycology, 2012, 24(4): 881-886.
- [28] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89-113.
- [29] Zhang Y R, Liu F, Shan T F, Pang S J. Stress resistance of young seedlings of *Sargassum horneri* to a variety of temperatures, irradiances and salinities revealed by chlorophyll fluorescence measurements. South China Fisheries Science, 2009, 5(2): 1-9.
- [30] Wen X G, Gong H M, Lu C M. Heat stress induces an inhibition of excitation energy transfer from phycobilisomes to photosystem II but not to photosystem I in a cyanobacterium *Spirulina platensis*. Plant Physiology and Biochemistry, 2005, 43(4): 389-395.
- [31] Tang W Z, Li X S, Huang H Y, Cai C E, Huo Y Z, He P M. Effects of different light intensity and temperature treatment on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in *Ulva linza*. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(5): 762-769.
- [32] Berry J, Björkman O. Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. Annual Review of Plant Physiology, 1980, 31(1): 491-543.
- [33] Franklin L A, Seaton G G R, Lovelock C E, Larkum A W D. Photoinhibition of photosynthesis on a coral reef. Plant, Cell and Environment, 1996, 19(7): 825-836.
- [34] Zhang T, Shen Z G, Yao C Y, Lu Q Q, Jiang H X, Zhu J Y, Xu P. Light adaptation characteristics of *Porphyra* studied by chlorophyll fluorescence technology. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(3): 140-147.
- [35] Seemann J R, Berry J A, Downton W J S. Photosynthetic response and adaptation to high temperature in desert plants: a comparison of gas exchange and fluorescence methods for studies of thermal tolerance. Plant Physiology, 1984, 75(2): 364-368.

参考文献:

- [2] 张继红, 方建光, 唐启升. 中国浅海贝藻养殖对海洋碳循环的贡献. 地球科学进展, 2005, 20(3): 359-365.
- [3] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 郑国侠, 杨宇峰. 中国近海生物固碳强度与潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 551-558.
- [9] 邹定辉, 高坤山, 阮祚禧. 高 CO₂ 浓度对石莼光合作用及营养盐吸收的影响. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2001, 31(6): 877-882.
- [11] 姜宏波, 田相利, 董双林, 包杰. 温度和光照强度对鼠尾藻生长和生化组成的影响. 应用生态学报, 2009, 20(1): 185-189.
- [12] 潘光华, 高山, 王广策, 解修俊. 温度和光照对孔石莼光合作用的影响. 海洋科学, 2011, 35(9): 14-17.
- [28] 张鑫, 邹定辉, 徐智广, 刘树霞. 大气 CO₂ 浓度升高和氮加富对羊栖菜生理生化特征的影响. 南方水产, 2007, 3(3): 35-40.
- [29] 张玉荣, 刘峰, 单体锋, 逢少军. 利用叶绿素荧光技术揭示人工培育的铜藻幼苗对胁迫温度、光照和盐度的反应. 南方水产, 2009, 5(2): 1-9.
- [31] 汤文仲, 李信书, 黄海燕, 蔡春尔, 霍元子, 何培民. 不同光强和温度对长石莼(缘管浒苔)光合作用和叶绿素荧光参数的影响. 水产学报, 2009, 33(5): 762-769.
- [34] 张涛, 沈宗根, 姚春燕, 陆勤勤, 姜红霞, 朱建一, 许璞. 基于叶绿素荧光技术的紫菜光适应特征研究. 海洋学报, 2011, 33(3): 140-147.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jian et al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元