

# 基于光合电子传递速率的浮游植物初级生产力测量

陈双<sup>1,3,4\*\*</sup>, 殷高方<sup>1,4</sup>, 赵南京<sup>1,4\*</sup>, 覃志松<sup>2</sup>, 张小玲<sup>1,4</sup>, 甘婷婷<sup>1,4</sup>, 刘建国<sup>1,4</sup>, 刘文清<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>桂林电子科技大学计算机与信息安全学院, 广西 桂林 541004;

<sup>3</sup>中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

<sup>4</sup>安徽省环境光学监测技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

**摘要** 快速、准确评估浮游植物的初级生产力对研究海洋生态环境科学及理解全球碳循环演变规律等至关重要。针对<sup>14</sup>C示踪法和黑白瓶法等传统方法表示的初级生产力存在测量周期长、操作繁琐等问题,依据生物膜能流理论,基于荧光动力学方法,即通过光源诱导产生可变叶绿素荧光获得光合参数,结合光合电子传递速率“生物-光学”模型,对基于荧光动力学参数的光合电子传递速率的测量进行研究。通过不同胁迫条件下蛋白核小球藻的测试,对比液相氧电极测量的光合放氧速率,验证光合电子传递速率测量浮游植物初级生产力的有效性。结果表明:在不同浓度的二氯苯基二甲脲的胁迫下,浮游植物的光合电子传递速率与光合放氧速率具有良好的一致性,且二者随胁迫浓度增加而减小明显,光合放氧速率与光合电子传递速率分别减小了 71.55% 和 68.87%,二者相关系数的平方达到 0.934;在不同营养盐或光照强度下胁迫培养 15 d,浮游植物的光合电子传递速率与光合放氧速率仍然具有良好的一致性,二者相关系数的平方大于 0.955。

**关键词** 生物光学; 光合电子传递速率; 初级生产力; 浮游植物; 光合放氧速率

中图分类号 X826

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1126001

## Measurement of Primary Productivity of Phytoplankton Based on Photosynthetic Electron Transport Rate

Chen Shuang<sup>1,3,4\*\*</sup>, Yin Gaofang<sup>1,4</sup>, Zhao Nanjing<sup>1,4\*</sup>, Qin Zhisong<sup>2</sup>, Zhang Xiaoling<sup>1,4</sup>,  
Gan Tingting<sup>1,4</sup>, Liu Jianguo<sup>1,4</sup>, Liu Wenqing<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>School of Computer Science and Information Security, Guilin University of Electronic Technology, Guilin,  
Guangxi 541004, China;

<sup>3</sup>School of Environmental Science and Optoelectronics, University of Science and Technology of China, Hefei,  
Anhui 230026, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Optical Monitoring Technology for Environment, Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Rapid and accurate assessment of the primary productivity of phytoplankton is crucial to scientific research of marine ecological environment and understanding of evolution rules of global carbon cycle. The measurement period of primary productive forces represented by the <sup>14</sup>C tracer method or the black and white bottle method is long and cumbersome. To solve the problem, we study the photosynthetic electron transfer rate according to the biofilm energy flow theory. Photosynthetic parameters are obtained by the variable chlorophyll fluorescence induced by light source, and combined with photosynthetic electron transfer rate “biological-optics”. Therefore, the measurement of photosynthetic electron transfer rate based on fluorescence kinetic parameters is studied. The chlorella pyrenoidosa is tested under different stress conditions, and the photosynthetic oxygen rate measured by the liquid phase oxygen electrode is compared to verify effectiveness of the photosynthetic electron transfer rate. The

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-05-29; 录用日期: 2018-06-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1400600)、青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金(QNLM2016ORP0312)、国家自然科学基金(31400317)、国家 863 计划(2014AA06A509)

\* E-mail: njzhao@aiofm.ac.cn; \*\* E-mail: schen@aiofm.ac.cn

results show that under different concentrations of dichlorophenyl dimethylurea stress, the photosynthetic electron transport rate and photosynthetic oxygen release rate of phytoplankton have good consistency, and both decrease significantly with the increase of the stress concentration. The photosynthetic oxygen release rate and photosynthetic electron transport rate are reduced by 71.55% and 68.87%, respectively, and their square of correlation coefficient is 0.934. Under different nutrients or light intensity for 15 d, the photosynthetic electron transport rate and photosynthetic oxygen release rate still have good consistency, and their square of correlation coefficient is greater than 0.955.

**Key words** diotechnology; photosynthetic electron transport rate; primary production; phytoplankton; photosynthetic oxygen release rate

**OCIS codes** 260.2510; 260.5130; 260.2160; 350.4600

## 1 引 言

初级生产力(GPP)是指浮游植物在单位时间、单位体积内通过光合作用固定有机物质的总量<sup>[1]</sup>,是进入生态系统的初始物质和能量,同时也是生态系统碳循环的基础。因此,对海洋浮游植物初级生产力的定量评估是研究海洋生态系统的重要环节,同时也是研究全球碳循环变化的重要手段<sup>[2]</sup>。

作为表示初级生产力的传统方法,<sup>14</sup>C 示踪法和黑白瓶法<sup>[3]</sup>等需要“现场采样—温育培养—离线分析”的过程,这一过程存在测量周期长、操作繁琐等不足。叶绿素荧光是光合作用的副产物,由其发展而来的叶绿色荧光技术是快速、无损测量浮游植物初级生产力的一种手段。1989年,Booth等<sup>[4]</sup>提出了测量浮游植物初级生产力的荧光方法,该方法通过测量自然环境产生的叶绿素荧光来反演叶绿素浓度,并假定叶绿素浓度与初级生产力的比值固定,具有操作简单、测量快速的优点,常被用于研究大区域海洋初级生产力。研究<sup>[5]</sup>发现,叶绿素浓度与初级生产力的比值会随光照和营养盐的变化而变化。Liu等<sup>[6]</sup>尝试利用遥感信息和地理信息系统(GIS)技术建立由海洋水色遥感资料反演浮游植物叶绿素浓度的方法,并结合相关算法估算初级生产力。由于衰亡的藻叶绿素荧光不会马上消失,因此以遥感影像为基础得到的初级生产力的计算值与实际值存在误差。植物通过光合作用裂解水分子、释放 O<sub>2</sub>、

进行电子传递和固定 CO<sub>2</sub> 是连续且一一对应的,因此 Kautsky 等<sup>[7]</sup>提出了利用活体荧光产率快速、定量反演光合作用过程的光合电子传递速率方法,该方法基于光源诱导产生的可变叶绿素荧光进行光合作用参数的测量,利用荧光参数计算得到的光合电子传递速率来描述光合作用的各个过程。Genty 等提出光合电子传递速率“生物-光学”测量模型<sup>[8]</sup>,该测量模型在叶绿素浓度与同化系数反演有效光合反应中心浓度的基础上,加入反应中心电荷分离效率等与生物活性相关的荧光参数。由于每种藻同化系数不为常数,因此模型测量结果存在偏差。1993年,Kolber等<sup>[9]</sup>结合荧光动力学曲线反演的荧光参数,进一步丰富浮游光合电子传递速率“生物-光学”测量模型,但仍没有解决采用叶绿素浓度反演有效光合反应中心浓度带来的问题。

本文依据生物能流过程,利用荧光动力学手段,通过光源诱导产生可变叶绿素荧光进行光合作用参数的测量,结合光合电子传递速率“生物-光学”测量模型,获得光合电子传递速率。以蛋白核小球藻为研究对象,并在光合活性抑制实验和藻类生长抑制实验的条件下,以液相氧电极法测得的光合放氧速率作为对照,验证光合电子传递速率的有效性。

## 2 分析模型

图 1 所示为浮游植物光合作用的能流过程。在浮游植物的光合作用过程中,光合细胞通过光合色

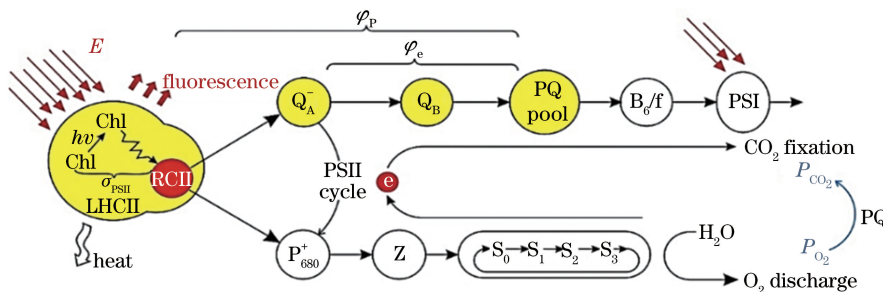


图 1 浮游植物光合作用能流过程示意图

Fig. 1 Energy flow process of photosynthesis of phytoplankton

素和捕光色素蛋白复合体(LHCII)吸收并传递光能到光合反应中心。传递的光能裂解附近的 2 个水分子,并释放 1 个 O<sub>2</sub> 分子,形成 4 个电子进行光合传递,固定 1 个 CO<sub>2</sub> 分子。因此,在衡量浮游植物初级生产能力方面,光合电子传递速率  $P_e$ 、光合放氧速率  $P_{O_2}$ 、光合固碳速率  $P_{CO_2}$  三者理论上是一致的。

浮游植物光合细胞单位体积内的光合电子传递速率  $P_e$  与吸收系数  $a_{PSII}$ 、光化学效率  $\varphi_{PSII}$  密切相关,即

$$P_e = a_{PSII} \varphi_{PSII} E, \quad (1)$$

式中: $E$  为环境光照强度。(1)式即浮游植物光合电子传递速率“生物-光学”测量模型。 $a_{PSII}$  指浮游植物单位体积光合细胞捕获的光能量,与光适应下的功能吸收截面  $\sigma'_{PSII}$  及有效光合反应中心浓度[RCII]成正比,即

$$a_{PSII} = [RCII] \sigma'_{PSII}. \quad (2)$$

$\sigma'_{PSII}$  表征单位体积反应中心光化学传递的能力;[RCII]表示单位体积光合细胞具备活性的反应中心总量,其满足表达式<sup>[10]</sup>

$$[RCII] = k F_0 / \sigma_{PSII}, \quad (3)$$

式中: $k$  为常数; $F_0$  为初始荧光; $\sigma_{PSII}$  为功能吸收截面。

结合(1)~(3)式,可得

$$P_e = k \sigma'_{PSII} F_0 \varphi_{PSII} E / \sigma_{PSII}. \quad (4)$$

参数  $\varphi_{PSII}$  表示光能量传递到有效反应中心后,电荷分离产生电子向后进行光化学传递的效率,即光适应下瞬时可变荧光产率  $F'_q$  与最大荧光产率  $F'_m$  的比值, $F'_q$  为光适应下最大荧光产率  $F'_m$  与光适应下最小荧光产率  $F'_0$  的差值,即

$$\varphi_{PSII} = (F'_m - F'_0) / F'_m = F'_q / F'_m. \quad (5)$$

由(4)式与(5)式得到光合电子传递速率计算公式为

$$P_e = k \sigma'_{PSII} F_0 E F'_q / (\sigma_{PSII} F'_m). \quad (6)$$

### 3 材料与方 法

以蛋白核小球藻(编号为 FACHB-5,购自中国科学院淡水藻种库)为实验对象,利用活性抑制实验和生长抑制实验,对光合电子传递速率  $P_e$  的测量结果进行分析和验证。同时采用 Clark 液相氧电极和可变光脉冲诱导荧光分析仪测量光合放氧速率  $P_{O_2}$  与光合电子传递速率  $P_e$ ,以光合放氧速率作为对照,验证  $P_e$  的有效性。

#### 3.1 实验条件

活性抑制实验采用二氯苯基二甲脲(DCMU)胁迫:DCMU 能与 D2 蛋白上的 Q<sub>A</sub> 位点结合,阻止 Q<sub>B</sub> 还原,抑制 Q<sub>A</sub> 到 Q<sub>B</sub> 的传递,从而阻断电子传递过程,进而实现光合作用的抑制。DCMU 在常温和中性条件下的水解速度可以忽略。

生长抑制实验采用营养盐与培养光照强度胁迫:藻类对营养盐的含量非常敏感,营养盐含量过高或过低都会对浮游植物的生长和生物活性产生影响,氮对藻类体内的叶绿素、光合酶等生化组分的生成和消耗有重要影响;光能不足与过剩都会导致藻类体内生化组分的变化,尤其是高光条件会使光合器官发生光钝化,引起光抑制。具体胁迫实验方法如表 1 所示。

表 1 胁迫实验条件设置

Table 1 Stress experimental condition setting

Experimental type	Initial mass concentration / ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Stress factor	Stress time	Stress condition
Activity inhibition	1155	DCMU	10 min	0,30,50,80,100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$
Growth inhibition	600	Light intensity	15 d	30,60,150,200,300,700 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
	450	Nitrogen	15 d	8,16,32,64,128,228,512 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

#### 3.2 光合电子传递速率的测定

采用可变光脉冲诱导荧光分析仪(AGHJ-TPLIF-I型,中国科学院安徽光学精密机械研究所)对不同处理条件下的各荧光参数进行测定。可变光脉冲诱导荧光分析仪主要利用不同形式的激发光脉冲来控制光合作用的电子状态,利用荧光产率曲线来描述光合作用的过程,如图 2 所示。采用滑动窗口斜率判定法、线性最小二乘(LLS)算法和迭代离散迭代算法<sup>[11]</sup>等反演荧光动力学曲线,可以得到

$$f(t) = F_0 + (F_m - F_0) C_t = F_0 + F_v C_t, \quad (7)$$

$A_n = (A_{n-1} + C_{n-1} / \sigma_{PSII}) \exp(-\Delta t / \tau_{QA})$ , (8) 式中: $F_m$  为最大荧光; $t$  为时间; $f$  为荧光产率; $C_t$  为  $t$  时刻关闭的反应中心比例; $n$  为采用周期数量; $A_n$  为第  $n$  个采样周期后开放的反应中心比例; $C_{n-1}$  为第  $n-1$  个采样周期后关闭的反应中心比例; $\Delta t$  为时间间隔; $\tau_{QA}$  为 PQ 平均还原时间。荧光动力学曲线分为快相和弛豫相,大部分荧光参数的反演在快相部分。从图 2 中可以看出,在快相阶段的开始和结束点可以反演初始荧光  $F_0$  和最大荧光  $F_m$ ,其他参数根据(7)式和(8)式计算获得。反演的光合作用参数为初始荧光  $F_0$ 、功能吸收截面  $\sigma_{PSII}$ 、有

光条件下的功能吸收截面  $\sigma'_{\text{PSII}}$ 、有光条件下的光化学效率  $F'_q/F'_m$  等。将反演的荧光参数代入(6)式,即可获得光合电子传递速率  $P_e$ 。

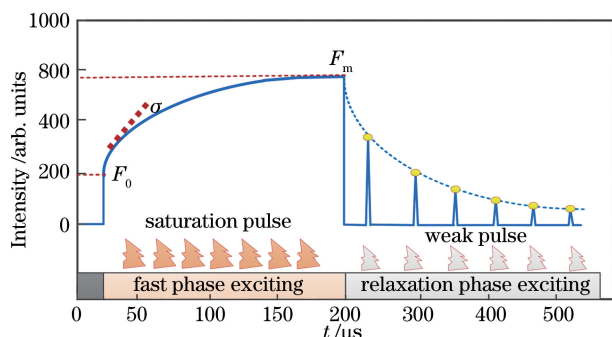


图 2 荧光动力学曲线反演荧光参数

Fig. 2 Fluorescence kinetic curve inversion of fluorescence parameters

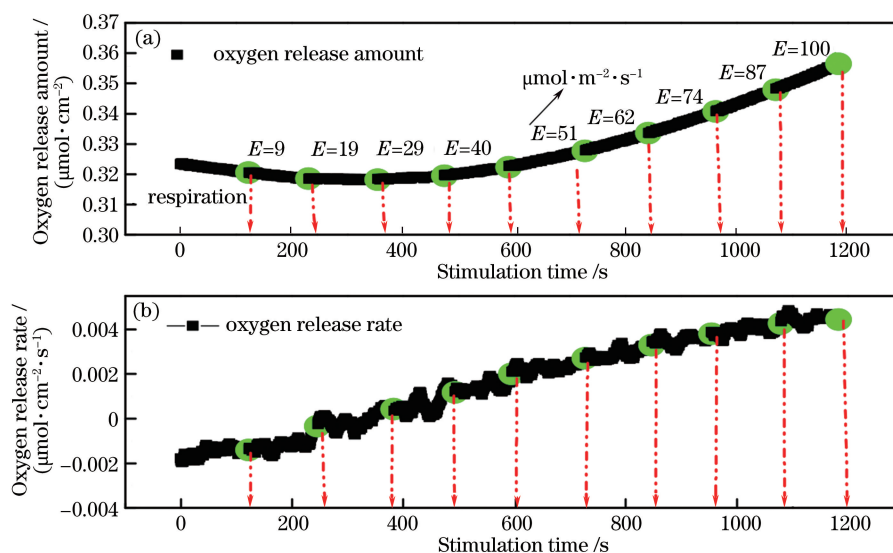


图 3 氧电极法测量得到的浮游植物的(a)光合放氧量与(b)光合放氧速率

Fig. 3 (a) Photosynthetic oxygen release amount and (b) photosynthetic oxygen release rate of phytoplankton measured by oxygen electrode method

## 4 结果与讨论

### 4.1 DCMU 胁迫作用下的实验结果

不同浓度 DCMU 胁迫蛋白核小球藻的结果如图 4 所示,其中 DCMU 浓度为 0 时为对照组。由图 4(a)可知,在 DCMU 胁迫下,随着环境光照强度增大,  $P_{O_2}$  值增大,当环境光照强度一定时,DCMU 胁迫浓度越大,  $P_{O_2}$  随着环境光照强度上升的速率越小。这说明在 DCMU 胁迫下,蛋白核小球藻放氧复合体裂解水放氧受到阻碍,并且胁迫越大,放氧复合体破坏越大。由图 4(b)可知,随着 DCMU 胁迫浓度增大,  $P_e$  与  $P_{O_2}$  具有相同的变化规律。由图 4(c)可知:当 DCMU 胁迫浓度小于  $80 \mu\text{mol/L}$  时,随着 DCMU 胁迫浓度

### 3.3 光合放氧速率的测定

使用 Clark 液相氧电极 (Chlorolab2 型, Hansatech 公司) 测定实验样品的光合放氧速率  $P_{O_2}$ 。藻样品的  $P_{O_2}$  由每个时刻放氧量的斜率计算得到,测量结果如图 3 所示。对于每种环境光照下测得的放氧量曲线,求其斜率即可得到该时刻下的  $P_{O_2}$ ,对该环境光照条件下所有时刻的  $P_{O_2}$  进行平均,即可得到该光照强度时的  $P_{O_2}$ 。但是得到的  $P_{O_2}$  仅为净光合速率的指标,为了与光合电子传递速率  $P_e$  的测量结果进行比较,需要在测定净光合速率前,置藻液于黑暗条件下进行呼吸速率的测定,将净光合速率转换为总光合速率。总光合速率用单位时间内单位浓度叶绿素的净光合速率与呼吸速率的和来度量。

增大,  $P_{O_2}$  与  $P_e$  均呈明显减小的趋势,  $P_{O_2}$  与  $P_e$  分别减小了 71.55% 和 68.87%;当 DCMU 胁迫浓度大于  $80 \mu\text{mol/L}$  时,随着 DCMU 胁迫浓度增大,  $P_{O_2}$  与  $P_e$  均不再发生变化。原因可能是 DCMU 浓度大于  $80 \mu\text{mol/L}$ ,超过了蛋白核小球藻所能承受胁迫浓度的阈值,导致藻细胞内部的光合机构发生了不可逆的损坏,使得蛋白核小球藻的初级生产力降到最小而不再变化。对  $P_{O_2}$  与  $P_e$  进行线性拟合与方差分析,分析结果如图 4(d)所示。由图 4(d)可知,  $P_{O_2}$  与  $P_e$  具有良好的一致性,相关系数的平方  $R^2$  为 0.934,且系数显著 ( $P < 0.05$ )。以上结果表明,当蛋白核小球藻处于 DCMU 胁迫状态时,  $P_e$  测量结果与标准测氧法的测量值具有良好的一致性,不仅能够反映蛋白核小



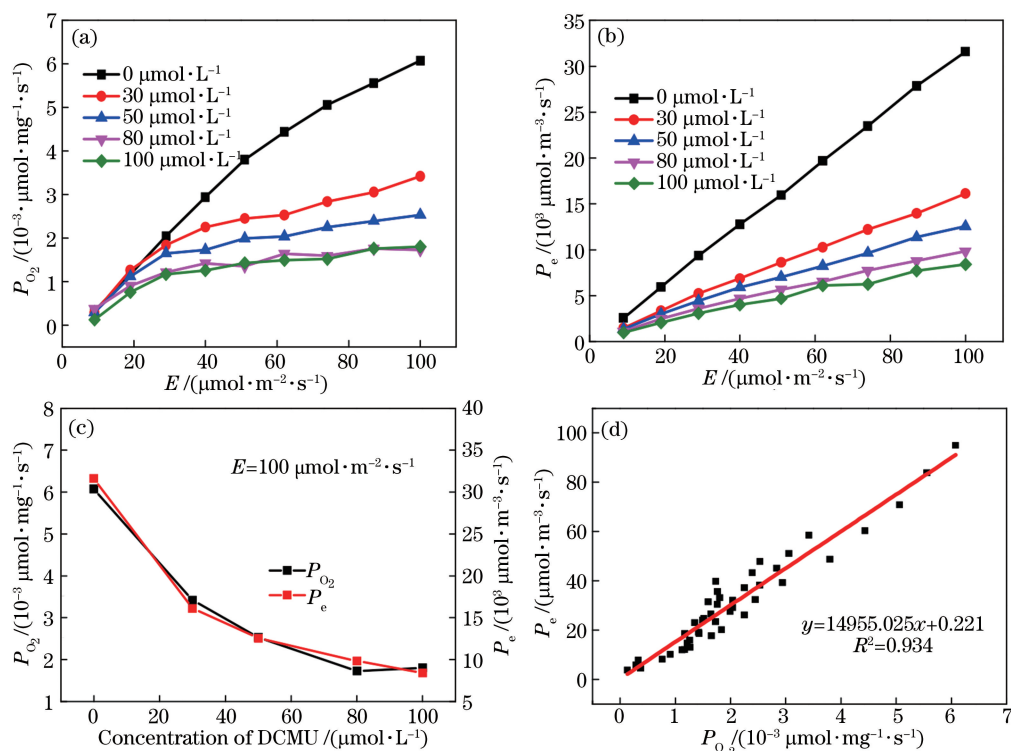


图4 在DCMU胁迫作用下,蛋白核小球藻光合电子传递速率 $P_e$ 与光合放氧速率 $P_{O_2}$ 的测量结果。(a) $P_{O_2}$ 随环境光照强度的变化;(b) $P_e$ 随环境光照强度的变化;(c) $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 随DCMU胁迫浓度的变化;(d) $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 的线性关系

Fig. 4 Measurement results of photosynthetic electron transport rate  $P_e$  and photosynthetic oxygen release rate  $P_{O_2}$  of *Chlorella pyrenoidosa* at stress of DCMU. (a) Variation of  $P_{O_2}$  with ambient light intensity; (b) variation of  $P_e$  with ambient light intensity; (c) variations of  $P_{O_2}$  and  $P_e$  with DCMU stress concentration; (d) linear relationship between  $P_{O_2}$  and  $P_e$ .

球藻受胁迫因子胁迫程度的大小,而且二者的相关性很好。下面将进一步对其在生长抑制条件下的相关性进行实验验证。

#### 4.2 氮胁迫作用下的实验结果

以氮质量浓度为 64 mg/L 培养基作为对照组进行氮胁迫研究,结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,在某种氮浓度的培养基下培养一段时间后,随着环境光照强度增大, $P_{O_2}$ 增大,培养在不同浓度氮培养基的蛋白核小球藻的 $P_{O_2}$ 随着环境光照强度上升的速率总是低于对照组。由图 5(b)可知,对于培养在不同氮浓度培养基中的蛋白核小球藻,其 $P_e$ 与环境光照强度的变化规律同 $P_{O_2}$ 与环境光照强度的变化规律相同。由图 5(c)可知,当氮的质量浓度为 64 mg/L时, $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 均达到最大值,其他浓度时均小于该浓度时的值,并且向两端呈明显减小的趋势。当氮的质量浓度小于 64 mg/L时,蛋白核小球藻处于氮缺乏的状态,其光合作用中的卡尔文循环受到影响,从而影响叶绿素的合成和细胞的分裂,同时叶

绿体是藻类进行光合作用的主要场所,氮的缺乏势必会造成初级生产力的下降;当氮的质量浓度大于 64 mg/L时,蛋白核小球藻处于氮过剩的状态,同样会损伤藻细胞结构,影响 $P_e$ 的正常进行,因此,营养盐浓度大于一定值会造成藻类初级生产力的快速下降。实验中发现,当氮的质量浓度达到 512 mg/L时, $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 均大于前一种氮浓度时的值,原因可能是实验设置的培养时间较长,使得蛋白核小球藻在高浓度氮培养基中产生了适应性。对 $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 进行线性拟合与方差分析,结果如图 5(d)所示。由图 5(d)可知, $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 具有良好的线性关系,相关系数的平方 $R^2$ 为 0.955,并且系数显著( $P < 0.05$ ),即不同氮浓度的培养条件下, $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 具有良好的线性关系。

#### 4.3 培养光照强度胁迫下的实验结果

以 150  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 为对照培养光照强度研究不同光照条件下 $P_{O_2}$ 与 $P_e$ 的线性关系。由图 6(a)可知:随着环境光照强度增大, $P_{O_2}$ 值增大;当

环境光照强度一定时,不同培养光照强度下的蛋白核小球藻的  $P_{O_2}$  值总是小于对照组的。由图 6(b) 可知,在不同的培养光照强度下,蛋白核小球藻的  $P_e$  随环境光照强度的变化规律相同。由图 6(c) 可知:当培养光照强度小于  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,蛋白核小球藻处于低光状态,此时光是蛋白核小球藻生长和电子传递的主要限制因子,因此光照强度的减小会造成藻的蛋白质合成和叶绿体数量的减少,从而导致初级生产力降低。当光照强度大于  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  后,发生高光抑制;当培养光照强度为  $150 \sim 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,随着培养光照强度增大,  $P_{O_2}$  与  $P_e$  迅速减小。大量研究表明,

强光下植物会表现出明显的光抑制,光照强度越大,胁迫时间越长,藻的光合场受损程度越大,在高光抑制条件下,放氧复合体极易受到破坏而出现初级生产力迅速下降。当培养光照强度为  $500 \sim 700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,随着培养光照强度增大,  $P_{O_2}$  与  $P_e$  没有明显的变化,说明蛋白核小球藻的光合机构与放氧复合体因受高光照强度胁迫而遭到破坏。由图 6(d) 可知,  $P_{O_2}$  与  $P_e$  的相关系数的平方  $R^2$  为 0.957, 并且系数显著 ( $P < 0.05$ )。综上,在不同培养光照强度胁迫下,光合放氧速率  $P_{O_2}$  与光合电子传递速率  $P_e$  具有良好的线性关系。

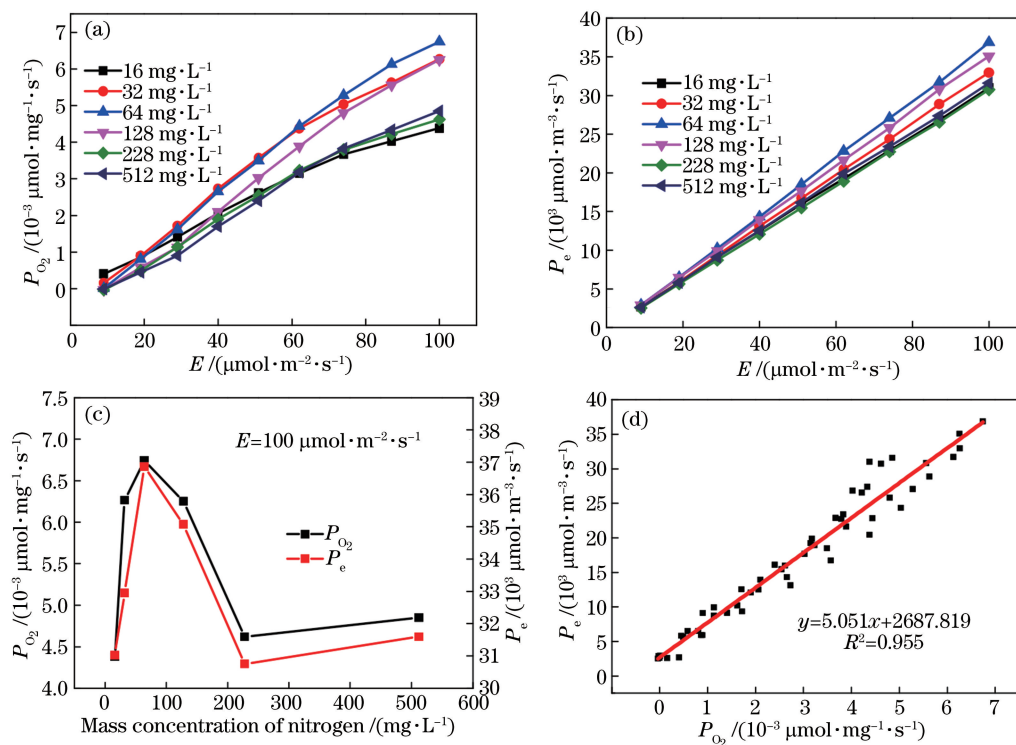


图 5 在氮胁迫作用下,蛋白核小球藻光合电子传递速率  $P_e$  与光合放氧速率  $P_{O_2}$  的测量结果。(a)  $P_{O_2}$  随环境光照强度的变化;(b)  $P_e$  随环境光照强度的变化;(c)  $P_{O_2}$  与  $P_e$  随氮胁迫浓度的变化;(d)  $P_{O_2}$  与  $P_e$  的线性关系

Fig. 5 Measurement results of photosynthetic electron transport rate  $P_e$  and photosynthetic oxygen release rate  $P_{O_2}$  of *Chlorella pyrenoidosa* at stress of nitrogen. (a) Variation of  $P_{O_2}$  with ambient light intensity; (b) variation of  $P_e$  with ambient light intensity; (c) variations of  $P_{O_2}$  and  $P_e$  with nitrogen stress concentration; (d) linear relationship between  $P_{O_2}$  and  $P_e$

## 5 结 论

荧光动力学法是基于光源诱导产生的可变叶绿素荧光进行光合作用参数测量的,在分析光合电子传递过程中发挥着重要作用,是实现浮游植物初级生产力快速测量的重要手段。本研究依据荧光动力学新一代浮游植物初级生产力原位/现场测量技术。

学,结合光合电子传递速率“生物-光学”测量模型,获得了基于荧光动力学参数的光合电子传递速率,在不同胁迫条件下,对比液相氧电极测得的光合放氧速率。结果表明,光合电子传递速率与光合放氧速率具有良好的一致性与线性关系。荧光动力学法无需样品预处理,具有快速、无损的特点,有望成为同时,该方法为浮游植物初级生产力的准确测量提

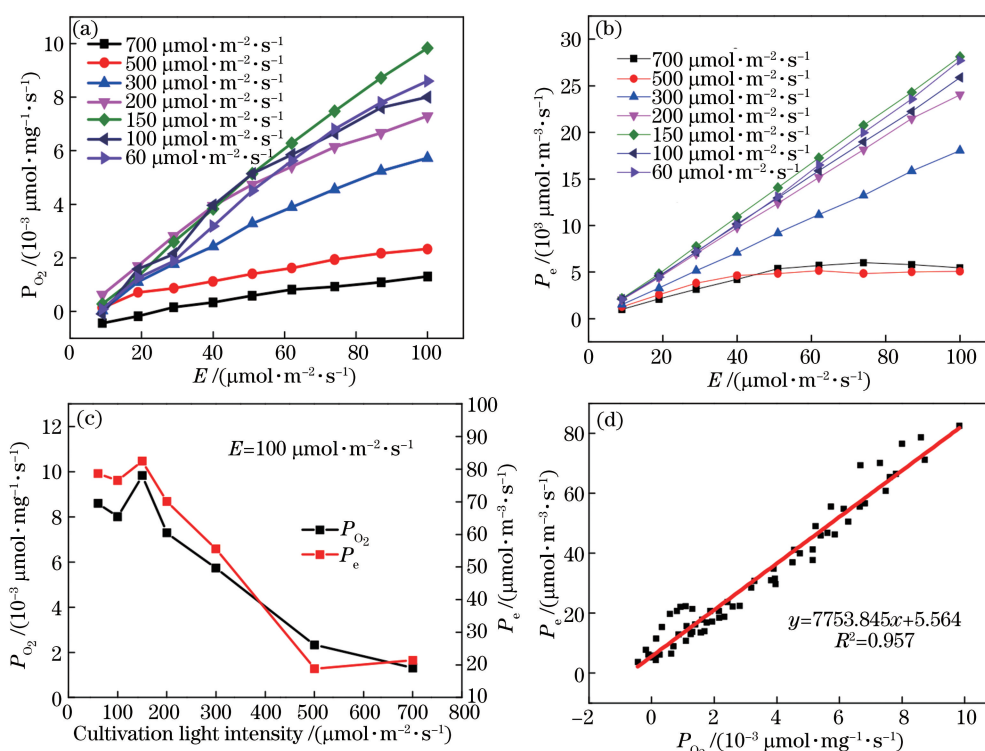


图 6 在培养光照强度胁迫作用下,蛋白核小球藻光合电子传递速率  $P_e$  与光合放氧速率  $P_{O_2}$  的测量结果。(a)  $P_{O_2}$  随环境光照强度的变化;(b)  $P_e$  随环境光照强度的变化;(c)  $P_{O_2}$  与  $P_e$  随培养光照强度的变化;(d)  $P_{O_2}$  与  $P_e$  的线性关系

Fig. 6 Measurement results of photosynthetic electron transport rate  $P_e$  and photosynthetic oxygen release rate  $P_{O_2}$  of *Chlorella pyrenoidosa* at stress of cultivation light intensity. (a) Variation of  $P_{O_2}$  with ambient light intensity; (b) variation of  $P_e$  with ambient light intensity; (c) variation of  $P_{O_2}$  and  $P_e$  with cultivation light intensity; (d) linear relationship between  $P_{O_2}$  and  $P_e$

供了一种途径,在研究海洋碳循环演变规律、气候变化和温室效应的防治等方面具有重要的科学意义和应用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Muller-Karger F E, Varela R, Thunell R, *et al.* The importance of continental margins in the global carbon cycle[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(1): L01602.
- [2] Behrenfeld M J, Randerson J T, McClain C R, *et al.* Biospheric primary production during an ENSO transition[J]. *Science*, 2001, 291 (5513): 2594-2597.
- [3] Pei S F, Laws E A. Does the  $^{14}C$  method estimate net photosynthesis? Implications from batch and continuous culture studies of marine phytoplankton[J]. *Deep-Sea Research Part I*, 2013, 82: 1-9.
- [4] Booth C R, Kiefer D A. Method and apparatus for determining concentrations of chlorophyll and the rate of primary production in water: 4804849 [P]. 1989-02-14.
- [5] Suggett D J, Moore C M, Hickman A E, *et al.* Interpretation of fast repetition rate (FRR) fluorescence: signatures of phytoplankton community structure versus physiological state[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 376: 1-19.
- [6] Liu J, Chen J M, Cihlar J, *et al.* Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (27): 735-754.
- [7] Kautsky H, Hirsch A. Neue versuche zur Kohlensaure assimilation[J]. *Naturwissenschaften*, 1931, 19: 964.
- [8] Chen J M, Liu J, Cihlar J, *et al.* Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 124(2/3): 99-119.
- [9] Kolber Z, Falkowski P G. Use of active fluorescence to estimate phytoplankton photosynthesis *in situ* [J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, 38(8): 1646-1665.

- [10] Chen S, Yin G F, Zhao N J, *et al.* Analysis of phytoplankton concentration of functional reaction centers based on fluorescence dynamics parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0630004.  
陈双, 殷高方, 赵南京, 等. 基于荧光动力学参数的浮游植物有效光合反应中心浓度分析[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0630004.
- [11] Qin Z S, Zhao N J, Yin G F, *et al.* Inversion method of plant photosynthesis parameter based on fast phase and relaxation fluorescence kinetics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0730002.  
覃志松, 赵南京, 殷高方, 等. 快相与弛豫荧光动力学植物光合作用参数反演方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0730002.