

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.02.009

何书晗, 张洪波, 欧阳添, 等. 链霉素驱动微藻叶绿素荧光动力学的响应研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(2): 81-89.

# 链霉素驱动微藻叶绿素荧光动力学的响应研究

何书晗<sup>1,2</sup>, 张洪波<sup>1,3</sup>, 欧阳添<sup>1</sup>, 施军琼<sup>1</sup>, 吴忠兴<sup>1</sup>

1. 西南大学 生命科学学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室/

重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715;

2. 重庆第九十五初级中学校, 重庆 400084; 3. 武汉中科瑞华生态科技股份有限公司, 武汉 430070

**摘要:** 为了探究微藻对链霉素的敏感性, 通过叶绿素荧光动力学(OJIP)分析蓝藻-拟柱胞藻(*Raphidiopsis raciborskii*)和绿藻-四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)对链霉素的响应. 研究表明, 链霉素对拟柱胞藻和四尾栅藻的反应中心耗散的能量( $DI_0/RC$ )、单位光面积吸收的能量( $ABS/CS_0$ )和单位反应中心吸收的能量( $ABS/RC$ )均有显著的促进作用, 对拟柱胞藻单位反应中心捕获的用于还原  $Q_A$  的能量( $TR_0/RC$ )起抑制作用, 且链霉素能够明显降低拟柱胞藻的光合驱动力. 利用质量浓度为 0.05~1.0 mg/L 和 1.0~20.0 mg/L 的链霉素分别培养拟柱胞藻和四尾栅藻, 其比生长率分别是对照组(0.00 mg/L)的 0.74~0.25 和 1.19~0.51 倍. 拟柱胞藻丙二醛含量和超氧化物歧化酶活性明显随链霉素质量浓度的升高而降低, 过氧化氢酶活性随链霉素质量浓度的升高而增加. 四尾栅藻的过氧化氢酶活性、丙二醛含量和超氧化物歧化酶活性对链霉素质量浓度响应敏感度低. 因此, 本研究认为蓝藻对链霉素的敏感性比绿藻显著, 主要原因是拟柱胞藻和四尾栅藻的能量分布存在显著差异.

**关键词:** 链霉素; 瞬时叶绿素荧光诱导动力学曲线; 光合机构;

拟柱胞藻; 四尾栅藻

中图分类号: Q949.2; X171.1

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)02-0081-09

## Dynamic Response of Chlorophyll Fluorescence in Microalgae Driven by Streptomycin

HE Shuhan<sup>1,2</sup>, ZHANG Hongbo<sup>1,3</sup>, OUYANG Tian<sup>1</sup>,  
SHI Junqiong<sup>1</sup>, WU Zhongxing<sup>1</sup>

收稿日期: 2022-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177055); 重庆市研究生科研创新项目(CYS21106, CYS20105).

作者简介: 何书晗, 硕士研究生, 主要从事藻类生理学研究.

通信作者: 吴忠兴, 博士, 教授.

1. School of Life Sciences, Southwest University/Key Laboratory of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education/Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources in Three Reservoir Region, Chongqing 400715, China;
2. Chongqing No. 95 Middle School, Chongqing 400084, China;
3. Zhongke Ruihua Ecological Technology Co. Ltd., Wuhan 430070, China

**Abstract:** The response of *Raphidiopsis raciborskii* and *Scenedesmus quadricauda* on streptomycin was determined by OJIP chlorophyll fluorescence kinetics to explore the sensitivity of microalgae to streptomycin. The results showed that streptomycin significantly facilitate the  $DI_0/RC$ ,  $ABS/CS_0$  and  $ABS/RC$  in *Raphidiopsis raciborskii* and *Scenedesmus quadricauda*, inhibited  $TR_0/RC$ , and markedly reduced the photosynthetic oxygen evolution and driving force in *Raphidiopsis raciborskii*. The specific growth rates of *Raphidiopsis raciborskii* (0.05~1.0 mg/L) and *Scenedesmus quadricauda* (1.0~20.0 mg/L) in streptomycin treatment group was 0.74~0.25 and 1.19~0.51 times as much as that of control (0.00 mg/L), respectively. This study found that the malondialdehyde and superoxide dismutase activities were decreased significantly, and catalase activity was increased in *Raphidiopsis raciborskii* with increase of streptomycin concentration. Malondialdehyde, superoxide dismutase and catalase activities in *Scenedesmus quadricauda* were not significantly affected by streptomycin. Therefore, our results suggested that cyanobacteria was more sensitive to streptomycin than green algae, the main reason is due to the significant difference on energy distribution between *Raphidiopsis raciborskii* and *Scenedesmus quadricauda*.

**Key words:** streptomycin; OJIP; photosynthetic apparatus; *Raphidiopsis raciborskii*; *Scenedesmus quadricauda*

抗生素在农业、水产养殖以及保障人们健康方面发挥着关键作用<sup>[1]</sup>。当前,渔业和畜牧业对抗生素的需求量大幅增加<sup>[2]</sup>。例如,美国每年约使用 1.6 万 t 抗菌化合物,其中约 70% 用于非药物治疗。澳大利亚、新西兰、加拿大和欧盟国家也观察到类似的抗生素使用模式<sup>[3]</sup>。水体中的抗生素通常来源于城市污水、制药业废水、畜牧业粪便废水、垃圾处理过程中的渗滤液和水产养殖过程中的饵料添加剂等<sup>[4]</sup>。因此,河流、湖泊、地下水和废水处理厂废水中抗生素的检出率较高,其质量浓度变化从 1 ng/L 到 1 000  $\mu\text{g/L}$ <sup>[1,5]</sup>。残留的抗生素不仅会毒害水生生物,还会造成耐药性问题<sup>[5-6]</sup>。当前,抗生素污染已引起全球科学界的关注。

光合自养型微藻是水生生态系统中的主要初级生产者<sup>[7]</sup>。水体中藻类物种丰富,密度及生物量庞大,且藻类对污染物敏感性高,常作为重金属、农药和抗生素等污染物生态风险评估的指示性物种<sup>[5,8]</sup>。抗生素是微生物产生的一类次级代谢产物,可以影响藻类的生长和存活<sup>[9]</sup>。其中,链霉素是一种氨基糖苷类抗生素,可以用来控制水果、蔬菜、烟草、观赏植物、池塘和水族箱上的细菌、真菌和藻类<sup>[10]</sup>。链霉素能与原核生物的 30S 核糖体结合,抑制蛋白质的生物合成<sup>[11]</sup>,还能阻碍生物的叶绿体发育,降低原核生物密度并抑制其生长繁殖<sup>[12]</sup>。Harrass 等<sup>[13]</sup>研究发现,水体中的蓝藻类对链霉素的敏感性较高,其质量浓度变化范围为 0.09~0.86 mg/L,绿藻类对链霉素敏感性相对较低,质量浓度变化范围为 0.66~37 mg/L。当前,有关抗生素对水体中浮游植物生态毒性的研究报道较广泛<sup>[14-17]</sup>,而关于抗生素与淡水微藻生理活性的关系、叶绿素荧光的响应机制报道较少。有研究发现,叶绿素荧光可以反映光合系统 II (PS II) 与环境胁迫变化的响应<sup>[15-16]</sup>。根据瞬时叶绿素荧光动力学参数变化特征,研究人员发现藻类生理状态与光合作用过程中的电子和光子流动有明显的相关性<sup>[15-17]</sup>。因此,本文通过研究链霉素对蓝藻-拟柱孢藻(*Raphidiopsis raciborskii*)和广布种绿藻-四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)的生长、叶绿素荧光和半致死浓度( $EC_{50}$ )的影响,探究不同门类微藻对链霉素的敏感性和耐受性差异,特别是光合系统 II 对链霉素的响应特征,旨在

为藻类毒理学研究提供新的视角, 并为藻类对抗生素等新型污染物的响应机制提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 培养条件

研究使用的藻株拟柱孢藻 (*Raphidiopsis raciborskii*) 和四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 购自中国科学院 (FACHB Collection; 中国武汉). 在 MA 培养基<sup>[18]</sup>中培养, 光暗比为 12 h: 12 h, 光照为  $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 温度  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 培养期内每天手动摇摆 3~5 次. 荧光显微镜下监测细菌污染比例不超过藻类生物量的 1%<sup>[19]</sup>. 拟柱孢藻培养基中链霉素 (Sigma, USA) 处理组的最终质量浓度分别为 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 和 1.0 mg/L, 四尾栅藻培养基中链霉素处理组的最终质量浓度分别为 1, 2, 5, 10 和 20 mg/L, 拟柱孢藻和四尾栅藻培养基对照组无链霉素处理, 每组设置 3 个重复.

### 1.2 比生长率、丙二醛含量和抗氧化酶活性

比生长率 ( $\mu$ ) 根据公式 (1) 计算.

$$\mu = (\ln C_{t_2} - \ln C_{t_1}) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中,  $C_{t_2}$  和  $C_{t_1}$  分别是  $t_2$  和  $t_1$  时的藻密度<sup>[19]</sup>.

培养 96 h 后, 在 8 000 rpm 和  $4^\circ\text{C}$  离心条件下收集所有藻类. 藻类样品放在 5 mL, 50 mmol/L 磷酸缓冲溶液 (pH=7.8) 中保存. 丙二醛 (MDA) 含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 的活性根据 Bai 等<sup>[19]</sup> 的测定方法进行测定.

### 1.3 叶绿素荧光诱导曲线和叶绿素荧光诱导动力学分析 (JIP-test)

使用植物效率分析仪 (PEA, Hansatech Instrument Ltd., 英国) 测量叶绿素荧光. 进行叶绿素荧光测试前, 将 2 mL 的藻液暗处理 30 分钟, 然后利用植物效率分析仪进行分析. 叶绿素荧光诱导动力学曲线参考 Kautsky 效应, JIP-test 参数由叶绿素荧光初始值计算获得<sup>[15-17, 20]</sup>.

### 1.4 数据分析

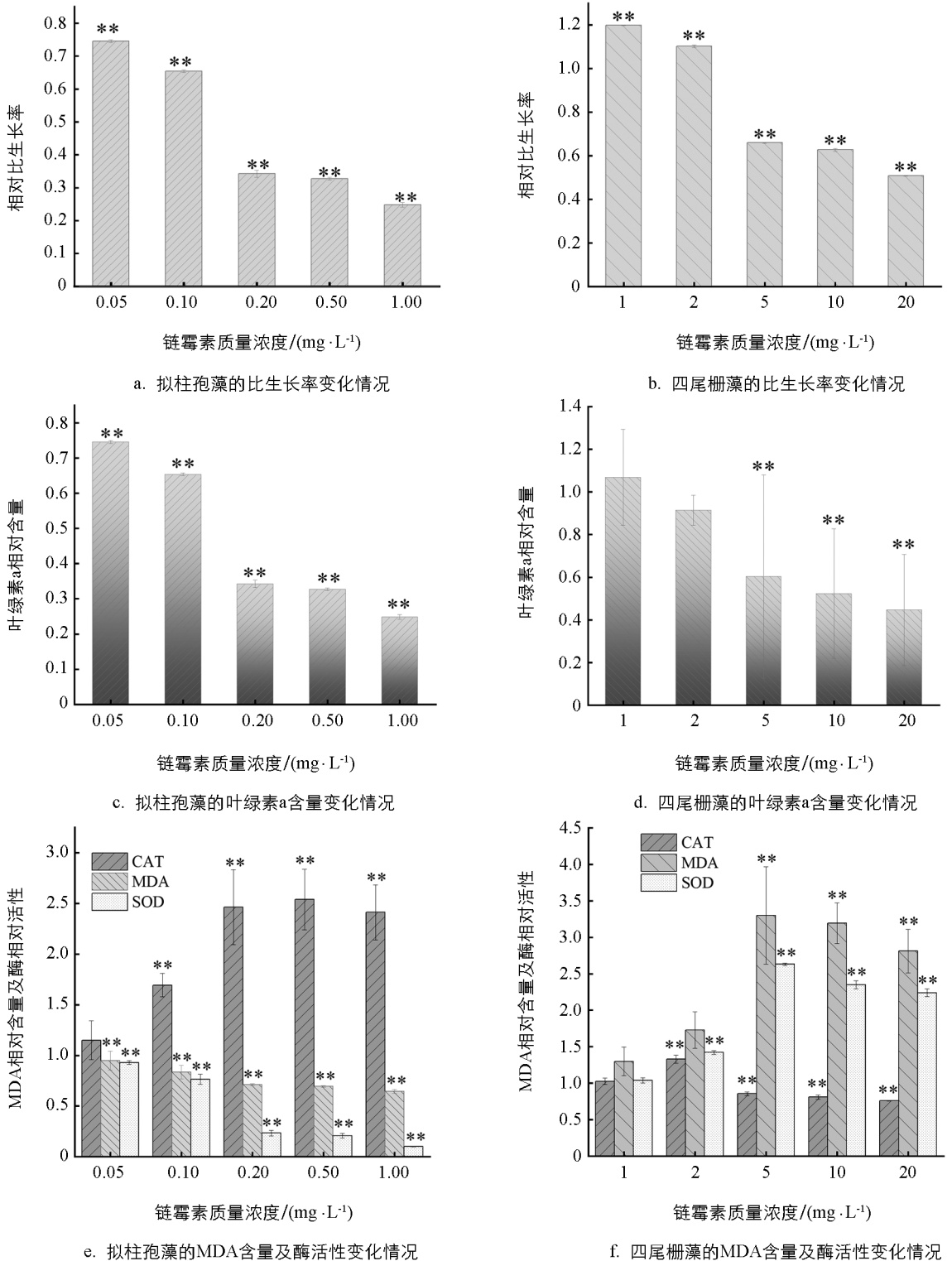
本研究的统计结果以平均值  $\pm$  标准方差表示, 使用 SPSS 16.0 软件进行方差分析 (ANOVA) 和 T 检验,  $p < 0.05$  为差异有统计学意义.

## 2 结果

### 2.1 比生长率、丙二醛含量、超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性

链霉素质量浓度为 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 和 1 mg/L 培养基中的拟柱孢藻的比生长率 ( $\mu$ ) 分别是对照组 (0.00 mg/L) 的 0.75, 0.64, 0.34, 0.33 和 0.25 倍 ( $p < 0.05$ ), 详见图 1a. 链霉素质量浓度为 1, 2, 5, 10 和 20 mg/L 培养基中的四尾栅藻的比生长率分别是对照组 (0.00 mg/L) 的 1.19, 1.10, 0.66, 0.63 和 0.51 倍 ( $p < 0.05$ ), 质量浓度为 1 和 2 mg/L 的链霉素处理组中微藻比生长率明显较对照组高 ( $p < 0.05$ ), 详见图 1b. 拟柱孢藻和四尾栅藻处理组叶绿素 a 含量与链霉素质量浓度的变化特征与比生长率相似, 详见图 1c 和图 1d. 拟柱孢藻和四尾栅藻的  $EC_{50}$  分别为  $(0.11 \pm 0.03)$  和  $(12.32 \pm 2.73)$  mg/L.

链霉素质量浓度为 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 和 1 mg/L 的培养基中, 拟柱孢藻的丙二醛 (MDA) 含量分别是对照组的 0.95, 0.83, 0.71, 0.69 和 0.65 倍, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性分别是对照组的 0.93, 0.77, 0.23, 0.21 和 0.10 倍, 过氧化氢酶 (CAT) 活性分别是对照组的 1.15, 1.69, 2.46, 2.54 和 2.41 倍 ( $p < 0.05$ ), 详见图 1e. 链霉素质量浓度为 5, 10 和 20 mg/L 的处理组中, 四尾栅藻的 MDA 含量、SOD 和 CAT 活性发生了显著变化, 明显与拟柱孢藻相异, 详见图 1f. 当链霉素质量浓度为 20 mg/L 时, 四尾栅藻的 MDA 含量和 SOD 活性明显升高, 分别为对照组的 2.81 和 2.24 倍, 而四尾栅藻的 CAT 活性显著下降, 是对照组的 0.76 倍. 链霉素质量浓度为 1 mg/L 时, 四尾栅藻的 MDA 含量、CAT 和 SOD 活性与对照组相比变化不显著 ( $p > 0.05$ ).



\*\* : 表示差异有统计学意义( $p < 0.05$ )

图 1 链霉素作用 96 h 后, 拟柱孢藻(*R. raciborskii*)和四尾栅藻(*S. quadricauda*)的比生长率、叶绿素 a 含量和 MDA 含量及酶活性变化情况

## 2.2 光合系统 II 的能量流动

叶绿素荧光诱导动力学参数最大光化学效率( $TR_0/ABS = \Phi_{P_0}$ ,  $t=0$ , 下同), 光合系统 II 活性反应中心捕获的激子驱动电子传递的比率( $ET_0/TR_0 = \Psi_0$ ), 电子从  $Q_{A-}$  转移到电子传递链的量子效率

( $ET_0/ABS = \Phi_{E0}$ ) 和热耗散量子比率 ( $\Phi_{D0}$ ) 变化特征见图 2a 和 2b. 拟柱孢藻和四尾栅藻中的  $\Phi_{P0}$  和  $\Phi_{E0}$  显著低于对照组 ( $p < 0.05$ ), 而  $\Phi_{D0}$  显著增加 ( $p < 0.05$ ). 由图 2a 和 2b 可知, 拟柱孢藻中  $\Psi_0$  增加, 而四尾栅藻的  $\Psi_0$  减少. 拟柱孢藻和四尾栅藻反应中心耗散的能量 ( $DI_0/RC$ )、单位光面积吸收的能量 ( $ABS/CS_0$ ) 和单位反应中心吸收的能量 ( $ABS/RC$ ) 变化特征见图 2c 和 2d. 不同质量浓度链霉素处理组的  $DI_0/RC$ ,  $ABS/CS_0$  和  $ABS/RC$  显著高于对照组 ( $p < 0.05$ ). 链霉素质量浓度为 1 mg/L 的处理组培养 96 h 后, 拟柱孢藻的  $DI_0/RC$ ,  $ABS/CS_0$  和  $ABS/RC$  均出现增加, 分别是对照组的 3.36, 1.24 和 2.63 倍 ( $p < 0.05$ ), 20 mg/L 链霉素的处理组中, 四尾栅藻的  $DI_0/RC$ ,  $ABS/CS_0$  和  $ABS/RC$  分别比对照组增加了 54.02, 7.03 和 16.24 倍 ( $p < 0.05$ ). 与对照组相比, 不同质量浓度链霉素培养的拟柱孢藻的  $TR_0/RC$  明显受到抑制, 而不同质量浓度链霉素培养的四尾栅藻的  $TR_0/RC$  均得到激活.

链霉素应激能量流动的管道模型如图 3 所示, 拟柱孢藻单位反应中心捕获的用于电子传递的能量 (在  $t=0$  时) ( $ET_0/RC$ ) 和单位反应中心捕获的用于还原  $Q_A$  的能量 ( $TR_0/RC$ ) 明显随链霉素质量浓度的增加而减少,  $DI_0/RC$  和  $ABS/RC$  则随链霉素质量浓度的增加而增加. 四尾栅藻的  $ET_0/RC$ ,  $TR_0/RC$  和  $ABS/RC$  在链霉素质量浓度较低 ( $< 2$  mg/L) 时显著增加, 而  $DI_0/RC$  在链霉素质量浓度较高时显著增加.

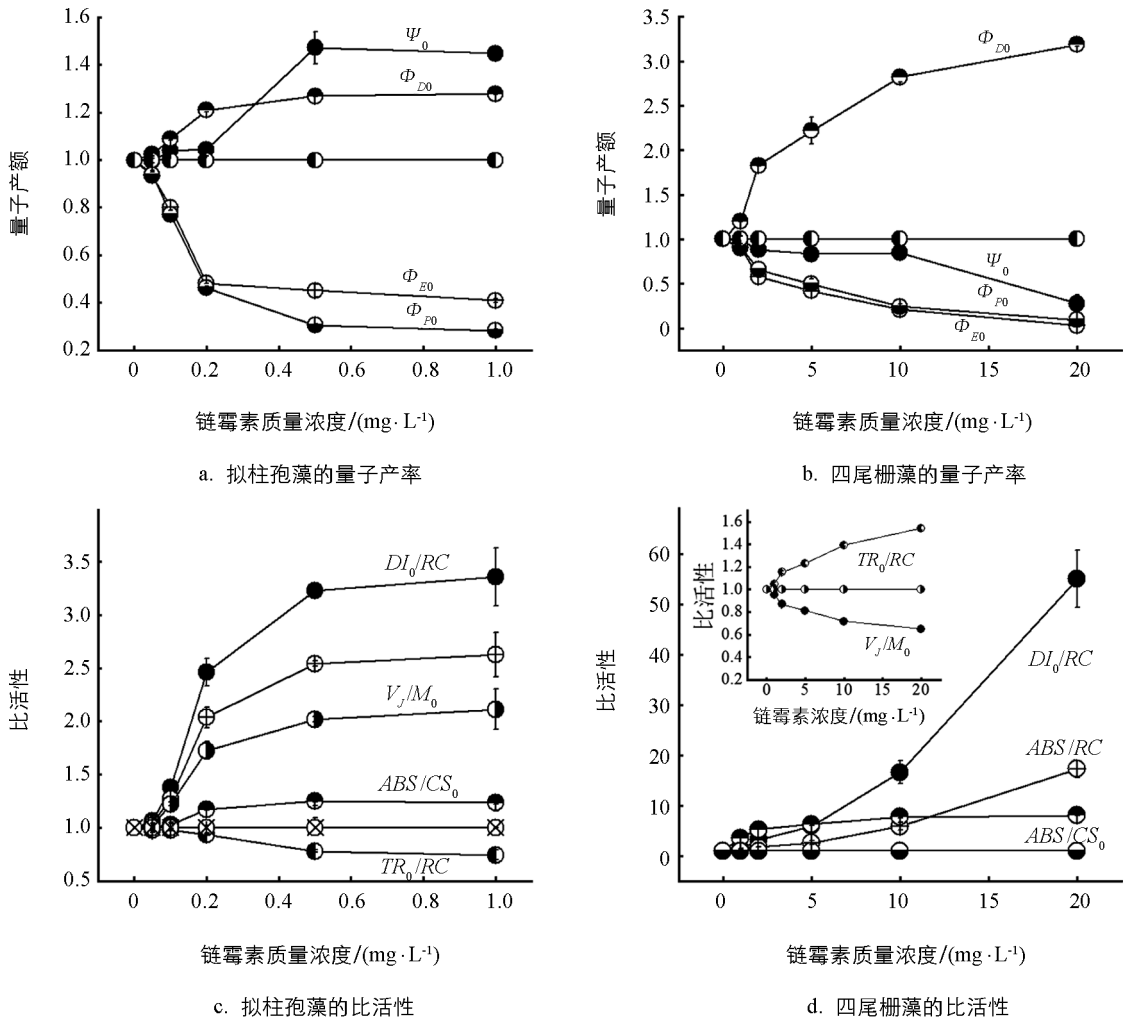


图 2 不同质量浓度链霉素处理对拟柱孢藻 (*R. raciborskii*) 和四尾栅藻 (*S. quadricauda*) 的量子产率及比活性相关参数的影响



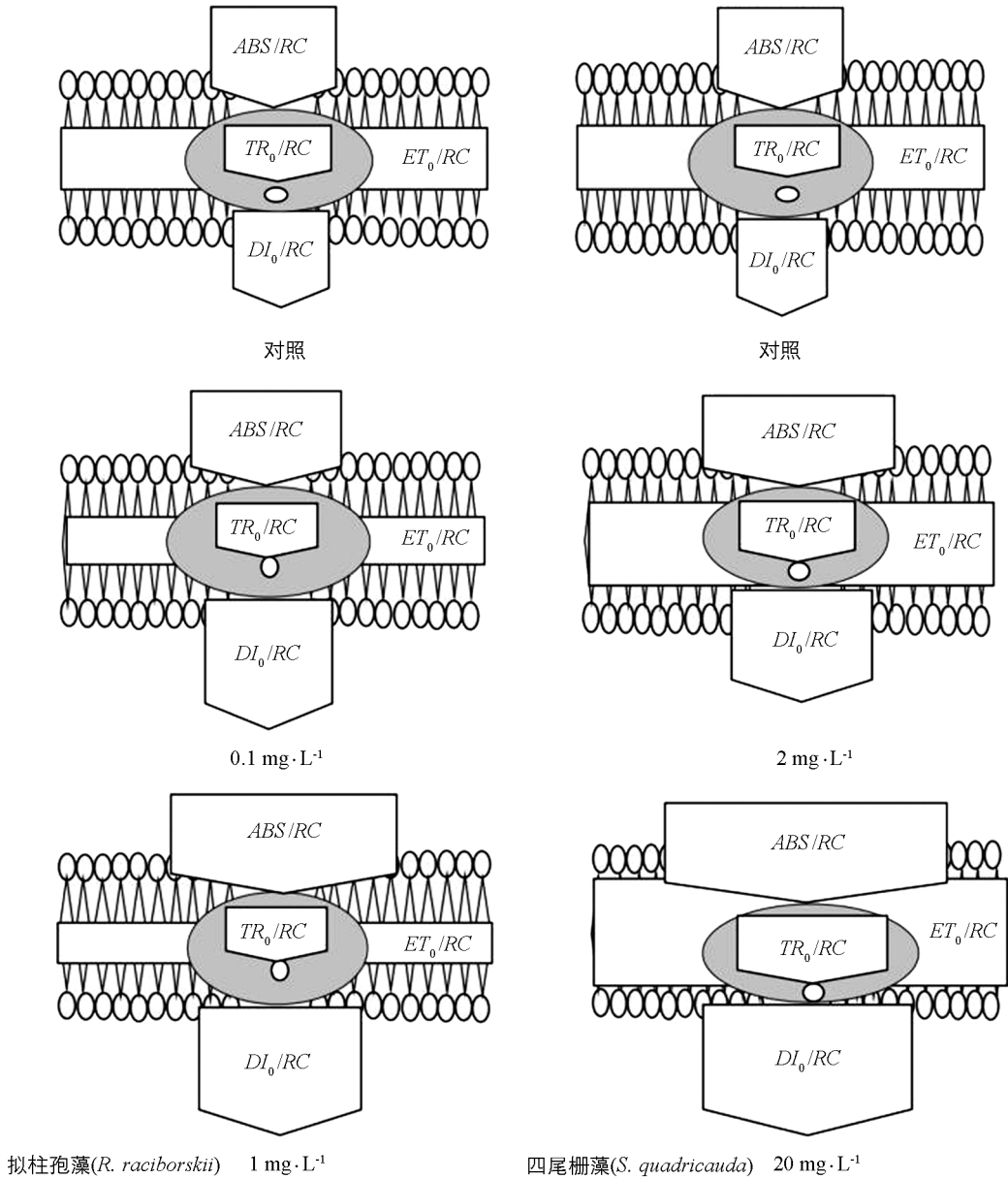


图 3 不同质量浓度链霉素处理下拟柱孢藻(*R. raciborskii*)和四尾栅藻(*S. quadricauda*)类囊体膜光合结构的能量通路模式图

### 3 讨论

#### 3.1 链霉素对生长、抗氧化机制和膜系统的影响

水环境中抗生素的检出率较高,这与抗生素大量用于人类和动物的传染病治疗有关<sup>[14]</sup>.有研究发现,抗生素对水体中的革兰氏阴性菌菌群、蓝藻的物种多样性和生物量有明显的抑制作用<sup>[21-24]</sup>,这表明残留在水体中的抗生素能通过改变水体环境中的细菌、原生动、藻类和浮游动物的数量破坏水体生态系统<sup>[25]</sup>.本研究发现,不同质量浓度的链霉素均可抑制拟柱孢藻和四尾栅藻的比生长率( $\mu$ ),链霉素质量浓度越高,抑制作用越明显,且蓝藻对链霉素的敏感性比绿藻更强,表明残留在水体中的低质量浓度抗生素对微藻及其生物量有抑制作用.链霉素对念珠藻(*Nostocales*)的最小抑制质量浓度是 0.28 mg/L,对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)的最小抑制质量浓度为 21 mg/L<sup>[13]</sup>,对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的 96 h  $EC_{50}$  值为 0.28 mg/L,对普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)的 96 h

$EC_{50}$  值为  $20.08 \text{ mg/L}$ <sup>[6]</sup>. 本研究发现, 链霉素对拟柱孢藻的 96 h  $EC_{50}$  值为  $(0.11 \pm 0.03) \text{ mg/L}$ , 四尾栅藻为  $(12.32 \pm 2.73) \text{ mg/L}$ , 这与前人研究结果相近, 表明较低质量浓度的链霉素能影响藻类种群的生长繁殖, 且蓝藻较绿藻敏感. 另有研究发现, 蓝藻的双分子脂膜系统缺少抗菌层细胞膜, 而绿藻的双分子脂膜系统能减少链霉素向真核藻类的转运, 因此, 绿藻对抗生素的敏感性低于蓝藻<sup>[6]</sup>.

藻类膜系统受到胁迫后会产生大量的活性氧(ROS), 活性氧的增加会引起清除活性氧的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)的活性增加, 且活性氧的积累会导致丙二醛(MDA)含量上升<sup>[6, 26]</sup>. MDA 被认为是生物对环境压力的反应产物<sup>[6]</sup>. 本研究发现, 不同质量浓度链霉素培养条件下的拟柱孢藻 MDA 含量显著降低 ( $p < 0.05$ ). 而暴露在链霉素环境中的四尾栅藻的 MDA 含量和 SOD 活性显著升高, CAT 活性明显下降 ( $p < 0.05$ ). SOD 可以将超氧自由基转化为过氧化氢, 过氧化氢可以被过氧化氢酶和过氧化物酶分解<sup>[27]</sup>. 显然, 四尾栅藻的 SOD 活性增加、CAT 活性降低有利于抵御 ROS 带来的氧化压力, 这与前人的研究一致<sup>[28]</sup>. 本研究发现, 低质量浓度链霉素处理拟柱孢藻时, MDA 含量显著降低 ( $p < 0.05$ ), 表明链霉素暴露下没有引起拟柱孢藻膜脂的严重损伤. 链霉素质量浓度提高到  $5 \text{ mg/L}$  时, 四尾栅藻的 MDA 含量表现出显著升高 ( $p < 0.05$ ), 表明细胞因脂质过氧化受到的损害越来越严重. 主要原因可能是链霉素对原核与真核生物的影响机制不同, 链霉素影响原核生物蛋白质的合成, 干扰真核生物叶绿体蛋白质的合成, 并导致胁迫后产生大量 ROS<sup>[29]</sup>.

### 3.2 链霉素对光合系统 II 的影响

光合色素吸收的太阳能在通过电子传递链时不断被损耗<sup>[30]</sup>. 本研究发现, 与对照组相比, 拟柱孢藻和四尾栅藻的  $\Phi_{P_0}$  和  $\Phi_{E_0}$  显著减少,  $\Phi_{D_0}$ ,  $DI_0/RC$ ,  $ABS/CS_0$  和  $ABS/RC$  显著增加. 链霉素胁迫对光合系统 II 的影响主要是维持能量同化和增强能量消耗<sup>[15, 31-32]</sup>. 拟柱孢藻和四尾栅藻的  $\Psi_0$  和  $TR_0/RC$  变化规律有明显差异, 这表明四尾栅藻光合系统 II 受体侧的电子传输效率较低, 因为捕获能量而被大量耗散<sup>[32]</sup>. 因此, 本研究认为, 当拟柱孢藻暴露在链霉素环境时, 从  $Q_A$  到  $Q_{A-}$  的电子传递是一个潜在的抑制靶点, 容易受到影响. 相反, 四尾栅藻的抑制靶点在  $Q_{A-}$  的下游, 受影响较小. 有研究表明, 不同质量浓度的污染物对藻类光合系统 II 的影响与藻类  $Q_A$  到  $Q_{A-}$  的电子传递有较大的相关性, 也可能与污染物暴露时间对藻类的发育和光合作用等的间接影响有关<sup>[33-35]</sup>.

通过反应中心的基本能量通量合并到管道模型中的研究发现,  $ABS/RC$  和  $DI_0/RC$  的相关性明显增强(图 3), 这是因为拟柱孢藻和四尾栅藻光合系统 II 对光能的接收能力发生了变化<sup>[36]</sup>, 本研究认为, 主要原因是不同光合系统 II 中单位反应中心的捕光复合物的数量发生了明显变化, 这与前人的研究一致<sup>[37]</sup>. 与拟柱孢藻相比, 四尾栅藻的优势在于它可以更好地以热能形式耗散电子传递链中的能量. 随着链霉素对这两个物种作用时间的增加, 微藻的光合结构遭到破坏, 单位面积上有活性的反应中心数量减少, 光合系统 II 电子传递受阻, 抑制光合作用, 导致微藻的生长受阻, 这与前人的研究相近<sup>[38]</sup>. 主要原因可能是光合系统 II 反应中心结构的改变, 导致不参与电子传递的封闭反应中心数量增加, 进而引起光合系统 II 供体侧的电子传递被抑制<sup>[13, 39]</sup>.

本研究认为, 拟柱孢藻和四尾栅藻都暴露于链霉素环境时, 它们的生长受到抑制, 抗氧化机制和膜系统受到损害. 与四尾栅藻相比, 拟柱孢藻对链霉素更敏感. 原核生物和真核生物在光合系统 II 上的生理差异是引起拟柱孢藻和四尾栅藻对链霉素敏感性差异的主要原因. 深层原因是链霉素在光合系统 II 中定位了不同的靶点, 这可用于区分原核生物和真核生物光合作用的异质性. 本研究为进一步探讨链霉素等抗生素压力下自然生态系统中藻类群落的组成提供了理论依据.

### 参考文献:

- [1] SARMAH A K, MEYER M T, BOXALL A B A. A Global Perspective on the Use, Sales, Exposure Pathways, Occurrence, Fate and Effects of Veterinary Antibiotics (VAs) in the Environment [J]. Chemosphere, 2006, 65(5): 725-759.

- [2] ANDREOZZI R, MAROTTA R, PINTO G, et al. Carbamazepine in Water: Persistence in the Environment, Ozonation Treatment and Preliminary Assessment on Algal Toxicity [J]. *Water Research*, 2002, 36(11): 2869-2877.
- [3] 于泳. 农田土壤中农药及抗生素快速筛查技术研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [4] ASHBOLT N J, AMÉZQUITA A, BACKHAUS T, et al. Human Health Risk Assessment (HHRA) for Environmental Development and Transfer of Antibiotic Resistance [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2013, 121(9): 993-1001.
- [5] LIN M, WU X, YAN Q, et al. Incidence of Antimicrobial-Resistance Genes and Integrons in Antibiotic-Resistant Bacteria Isolated from Eels and Aquaculture Ponds [J]. *Diseases of Aquatic Organisms*, 2016, 120(2): 115-123.
- [6] QIAN H F, LI J J, PAN X J, et al. Effects of Streptomycin on Growth of *Algae Chlorella Vulgaris* and *Microcystis Aeruginosa* [J]. *Environmental Toxicology*, 2012, 27(4): 229-237.
- [7] 孙传范. 微藻水环境修复及研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2011, 13(3): 92-96.
- [8] ISIDORI M, LAVORGNA M, NARDELLI A, et al. Toxic and Genotoxic Evaluation of Six Antibiotics on Non-Target Organisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 346(1-3): 87-98.
- [9] BEN Y J, FU C X, HU M, et al. Human Health Risk Assessment of Antibiotic Resistance Associated with Antibiotic Residues in the Environment: A Review [J]. *Environmental Research*, 2019, 169: 483-493.
- [10] THOMPSON A C, SIKOROWSKI P P. Effect of Streptomycin Sulfate on the Chemistry and Growth of *Heliothis Vi-rescens* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 1983, 74(2): 255-258.
- [11] SONG W, KIM Y H, SIM S H, et al. Antibiotic Stress-Induced Modulation of the Endoribonucleolytic Activity of RNase III and RNase G Confers Resistance to Aminoglycoside Antibiotics in *Escherichia Coli* [J]. *Nucleic Acids Research*, 2014, 42(7): 4669-4681.
- [12] SCHWARTZBACH S D, SCHIFF J A. Chloroplast and Cytoplasmic Ribosomes of *Euglena*: Selective Binding of Dihydrostreptomycin to Chloroplast Ribosomes [J]. *Journal of Bacteriology*, 1974, 120(1): 334-341.
- [13] HARRASS M C, KINDIG A C, TAUB F B. Responses of Blue-Green and Green Algae to Streptomycin in Unialgal and Paired Culture [J]. *Aquatic Toxicology*, 1985, 6(1): 1-11.
- [14] DAUGHTON C G, TERNES T A. Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: Agents of Subtle Change? [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1999, 107(S 6): 907-938.
- [15] STRASSER R J, SRIVASTAVA A, TSIMILLI-MICHAEL M. The Fluorescence Transient as a Tool to Characterize and Screen Photosynthetic Samples [M] // *Probing Photosynthesis: Mechanisms Regulation and Adaptation*. London: Taylor and Francis Press, 2000.
- [16] 杜雨欣, 代潇潇, 杨燕君, 等. 不同氮源对淡水多甲藻生长和叶绿素荧光参数的影响 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(10): 38-44.
- [17] STRASSER B J, STRASSER R J. Measuring Fast Fluorescence Transients to Address Environmental Questions: The JIP-Test [M] // *Photosynthesis: from Light to Biosphere*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1995: 4869-4872.
- [18] ICHIMURA T. Isolation and Culture Methods of Algae [M] // *Methods in Phycological Studies*. Tokyo: Kyoritu Shuppan, 1979.
- [19] BAI F, LIU R, YANG Y J, et al. Dissolved Organic Phosphorus Use by the Invasive Freshwater Diazotroph Cyanobacterium, *Cylindrospermopsis Raciborskii* [J]. *Harmful Algae*, 2014, 39: 112-120.
- [20] KAUTSKY H, HIRSCH A. Neue Versuche Zur Kohlensäureassimilation [J]. *Naturwissenschaften*, 1931, 19(48): 964.
- [21] GRENNI P, ANCONA V, BARRA CARACCILO A. Ecological Effects of Antibiotics on Natural Ecosystems: A Review [J]. *Microchemical Journal*, 2018, 136: 25-39.
- [22] ECKERT E M, QUERO G M, DI CESARE A, et al. Antibiotic Disturbance Affects Aquatic Microbial Community Composition and Food Web Interactions but not Community Resilience [J]. *Molecular Ecology*, 2019, 28(5): 1170-1182.
- [23] VAN BRUGGEN A H C, GOSS E M, HAVELAAR A, et al. One Health-Cycling of Diverse Microbial Communities as



- a Connecting Force for Soil, Plant, Animal, Human and Ecosystem Health [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 927-937.
- [24] QUINLAN E L, NIETCH C T, BLOCKSOM K, et al. Temporal Dynamics of Periphyton Exposed to Tetracycline in Stream Mesocosms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(24): 10684-10690.
- [25] DANNERM C, ROBERTSON A, BEHREND S V, et al. Antibiotic Pollution in Surface Fresh Waters: Occurrence and Effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 793-804.
- [26] BAI F, JIA Y L, YANG C P, et al. Multiple Physiological Response Analyses Aid the Understanding of Sensitivity Variation between *Microcystis Aeruginosa* and *Chlorella* Sp. under Paraquat Exposures [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2019, 31: 1-17.
- [27] CHO U H, SEO N H. Oxidative Stress in *Arabidopsis Thaliana* Exposed to Cadmium is Due to Hydrogen Peroxide Accumulation [J]. *Plant Science*, 2005, 168(1): 113-120.
- [28] MORELLI E, SCARANO G. Copper-Induced Changes of Non-Protein Thiols and Antioxidant Enzymes in the Marine Microalga *Phaeodactylum Tricornutum* [J]. *Plant Science*, 2004, 167(2): 289-296.
- [29] TORRES M A, BARROS M P, CAMPOS S C G, et al. Biochemical Biomarkers in Algae and Marine Pollution: A Review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 71(1): 1-15.
- [30] MITTLER R. Oxidative Stress, Antioxidants and Stress Tolerance [J]. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(9): 405-410.
- [31] MULLER P, LI X P, NIYOGI K K. Non-Photochemical Quenching. A Response to Excess Light Energy [J]. *Plant Physiology*, 2001, 125(4): 1558-1566.
- [32] PERRON M C, QIU B S, BOUCHER N, et al. Use of Chlorophyll a Fluorescence to Detect the Effect of Microcystins on Photosynthesis and Photosystem II Energy Fluxes of Green Algae [J]. *Toxicon*, 2012, 59(5): 567-577.
- [33] BRESSAN M, BRUNETTI R. The Effects of Nitrioloacetic Acid, Cd and Hg on the Marine Algae *Dunaliella Tertiolecta* and *Isochrysis Galbana* [J]. *Water Research*, 1988, 22(5): 553-556.
- [34] WEI L P, THAKKAR M, CHEN Y H, et al. Cytotoxicity Effects of Water Dispersible Oxidized Multiwalled Carbon Nanotubes on Marine Alga, *Dunaliella Tertiolecta* [J]. *Aquatic Toxicology*, 2010, 100(2): 194-201.
- [35] THAKKAR M, MITRA S, WEI L P. Effect on Growth, Photosynthesis, and Oxidative Stress of Single Walled Carbon Nanotubes Exposure to Marine Alga *Dunaliella Tertiolecta* [J]. *Journal of Nanomaterials*, 2016, 2016: 1-9.
- [36] LAVERGNE J, TRISSL H W. Theory of Fluorescence Induction in Photosystem II: Derivation of Analytical Expressions in a Model Including Exciton-Radical-Pair Equilibrium and Restricted Energy Transfer between Photosynthetic Units [J]. *Biophysical Journal*, 1995, 68(6): 2474-2492.
- [37] APPENROTH K J, STÖCKEL J, SRIVASTAVA A, et al. Multiple Effects of Chromate on the Photosynthetic Apparatus of *Spirodela Polyrrhiza* as Probed by OJIP Chlorophyll a Fluorescence Measurements [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 115(1): 49-64.
- [38] 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 等. 基于叶绿素荧光探讨链霉素对念珠藻生长及光合毒性效应 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(3): 664-669.
- [39] LAZÁR D, POSPÍŠIL P, NAUŠ J. Decrease of Fluorescence Intensity after the K Step in Chlorophyll a Fluorescence Induction is Suppressed by Electron Acceptors and Donors to Photosystem 2 [J]. *Photosynthetica*, 1999, 37(2): 255-265.

责任编辑 孙文静  
崔玉洁