

无机磷对多甲藻生长及叶绿素荧光的影响^①

杨燕君¹, 许金铸², 吴忠兴¹, 施军琼¹

1. 西南大学 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. 重庆市万盛环保局, 重庆 万盛 400800

摘要: 磷通常被认为是水体藻类生长第一限制因子, 水体中磷的质量浓度对藻类生长与光合作用有着重要的影响. 多甲藻(*Peridinium umbonatum*)是淡水甲藻水华常见的种类, 而磷对其影响的研究甚少. 以多甲藻为研究对象, 探讨不同质量浓度无机磷源对多甲藻的生长及叶绿素荧光的影响. 结果表明, 随着无机磷质量浓度的增加, 多甲藻的吸光度(OD)也增加. 从培养期的第 11 d 开始, 磷质量浓度为 0.1 和 0.6 mg/L 处理下的多甲藻的 OD 值高于无磷(0 mg/L)与低磷(0.005, 0.02 mg/L)处理. 叶绿素荧光动力学参数结果发现, 当磷质量浓度为 0.005mg/L 与 0.02mg/L 时, PSII 单位反应中心(RC)耗散掉的能量(DI_0/RC), 单位反应中心捕获的并用于还原 QA 的能量(TR_0/RC), 单位反应中心传递到电子传递链末端的能量(RE_0/RC), 单位面积(CS)吸收的光能(ABS/CS_0), 单位面积的耗散(DI_0/CS_0), 单位面积捕获的光能(TR_0/CS_0), 单位面积电子传递的量子产额(ET_0/CS_0), 单位面积传递到电子传递链末端的能量(RE_0/CS_0), 吸收的能量传递到电子链末端的量子产率(R_0)与无磷处理组差异无统计学意义. 而磷质量浓度高于 0.1 mg/L 时, 荧光参数与无磷处理组差异有统计学意义($p < 0.05$). 这些结果表明了高磷处理(0.1, 0.6 mg/L)显著促进了多甲藻的生长与光合作用, 而无磷与低磷条件则对甲藻的生长与光合产生一定胁迫, 也暗示了磷质量浓度的变化可能影响多甲藻水华的发生及过程.

关键词: 多甲藻; 无机磷; 生长; 叶绿素荧光; JIP 测定

中图分类号: S555

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)08-0026-08

甲藻(Dinoflagellate)是水生态系统中浮游植物的重要组成部分, 也是形成赤潮和水华的主要种类之一^[1]. 甲藻形成的赤潮已经被广泛报道^[2], 但是对淡水甲藻水华的研究则相对较少. 近年来, 随着水体富营养化的加剧, 已有大量淡水甲藻水华事件的报道^[3-4]. 关于淡水甲藻水华的发生, 存在着许多争议. 有些研究表明水体富营养化直接导致了甲藻水华的发生^[5], 但有研究发现甲藻水华也会发生在中营养或贫营养水体中, 与水体富营养化并没直接关系^[6-7]. 因此, 探讨营养盐对甲藻水华的发生则具有重要的意义.

营养盐浓度是影响浮游植物生长的重要因素, 它不仅影响浮游植物生长速率、生化组成, 而且影响浮游植物群落结构及空间格局^[8-10]. 磷是植物的必需元素, 它不仅参与植物生长发育过程中的各种代谢活动, 而且也影响着植物细胞膜结构、信号传导和光合作用以及某些酶的活性调节等^[11]. 无机磷因能被藻类直接吸收利用, 被认为是藻类生长、繁殖最重要的磷源. 然而, 水体中的磷主要以颗粒态的形式存在, 能被藻类

① 收稿日期: 2015-12-04

基金项目: 中央高校基本业务费专项(XDJK2016C111); 国家自然科学基金项目(31170372); 西南大学博士基金项目(SWU110065).

作者简介: 杨燕君(1991-), 女, 四川广安人, 硕士研究生, 主要从事藻类生理学的研究.

通信作者: 施军琼, 实验师.

直接利用的无机磷质量浓度往往少于水体中总磷质量浓度的 5%，因此，磷已被认为是淡水水体中最主要的限制性元素^[12-13]. 通过对野外甲藻水华的监测以及前人研究表明，磷的质量浓度与甲藻生物量之间呈显著正相关性^[14]. 然而，磷如何影响甲藻的生长及水华的发生则较少研究.

因此，本研究以淡水甲藻—多甲藻为对象，通过叶绿素荧光动力学曲线(OJIP)及相关参数的变化，分析不同无机磷质量浓度对多甲藻光合作用过程中的能量流动、电子传递的影响，旨在探讨多甲藻生长及光合系统 PSII 对不同磷质量浓度的响应，为进一步研究淡水甲藻水华发生及过程提供重要依据.

1 材料与方法

1.1 藻体培养

实验所用多甲藻(*Peridinium umbonatum*)来自中国科学院武汉水生所淡水藻种库. 藻种置于 119 培养基(表 1)中进行培养, 培养条件为温度(25±1)℃, 光强 30 μmol/(m²·s), 光照周期为 12L:12D. 到达对数期后, 置于离心机中 4 000 r/min 离心 5 min, 弃上清液, 用无磷的 119 培养基清洗, 以去除表面吸附的磷. 重复洗涤, 离心 3 次后, 转入无磷 119 培养基中, 进行磷饥饿培养 48 h 后作为实验用藻.

配制 5 种不同质量浓度无机磷的 119 培养基(表 1), 其中称取磷酸二氢钾磷(>99.5%)配置磷源母液, 添加不同体积的磷源母液使培养基中最终磷质量浓度分别为 0 mg/L, 0.005 mg/L, 0.02 mg/L, 0.1 mg/L 和 0.6 mg/L. 将磷饥饿培养后的甲藻等体积接入各个培养基中, 在上述条件下培养, 每个处理设置 3 个重复.

表 1 119 培养基组成成分及质量浓度

组 分	母液质量浓度		用 量
	(每 100 mL 含 dH ₂ O 的克数)/g		
NaNO ₃	5		1mL/L
MgSO ₄ • 7H ₂ O	1. 5		1mL/L
KH ₂ PO ₄	0. 7		1mL/L
CaCl ₂ • H ₂ O	1		1mL/L
Na ₂ SiO ₃ 9 H ₂ O	0. 5		1mL/L
KHCO ₃	1		1mL/L
Na ₂ CO ₃	0. 5		1mL/L
维生素 H(Biotin)	0. 001		10 μL/L
PIV			1 mL/L
EDTA-Fe			1 mL/L

1.2 生长指标测定

从接入藻种的初始天开始每 2 d 取藻液 5 mL, 用紫外分光光度计(UV-2550, 岛津)在 451 nm 波长下测定其吸光度(OD).

1.3 叶绿素荧光的测定

每个处理各取 2.5 mL 对数期的藻液, 经 20 min 的暗适应后, 用植物效率分析仪(Handy PEA/LPA₂, Hansatech)测定 OJIP 曲线, 测定光强为 3 000 μmol/(m²·s), 测定结果包含了能够准确记录 O-J-I-P 等阶, 即从 10 μs 到 2 s 的叶绿素荧光变化^[15]. 通过 OJIP 曲线的变化及计算, 获得了以下参数: F_0 , F_m , F_v , V_j , S_m , DI_0/RC , TR_0/RC , RE_0/RC , ABS/CS_0 , DI_0/CS_0 , TR_0/CS_0 , ET_0/CS_0 , RE_0/CS_0 和 PI_{ABS} . 获得的 OJIP 曲线相关参数及其含义如表 2^[16].

1.4 数据处理及分析

所有实验数据的处理和分析均在 SPSS 17.0 中进行, 采用方差分析进行数据统计, $p<0.05$ 为差异有

统计学意义. 用 Origin6.1 绘制文中所有图形.

表 2 选取的 JIP-测定参数及其意义

OJIP 参数	含 义
F_0	暗适应后的最小荧光强度, 即所有反应中心完全开放时的荧光强度
F_m	暗适应后的最大荧光强度, 即所有反应中心完全关闭时的荧光强度
F_v	黑暗中最大可变荧光强度
DI_0/RC	$t=0$ 时单位反应中心(RC)耗散掉的能量
TR_0/RC	$t=0$ 时单位反应中心(RC)捕获的并用于还原 QA 的能量
RE_0/RC	单位反应中心(RC)传递到电子传递链末端的能量
ABS/CS_0	$t=0$ 时单位面积(CS)吸收的光能
DI_0/CS_0	$t=0$ 时单位面积(CS)的热耗散
TR_0/CS_0	$t=0$ 时单位面积(CS)捕获的光能
ET_0/CS_0	$t=0$ 时单位面积(CS)电子传递的量子产额
RE_0/CS_0	单位面积(CS)传递到电子传递链末端的能量
V_J	在 J 点的相对可变荧光强度
S_m	y 轴及荧光强度($F=F_m$)之间的面积
PI_{ABS}	以吸收光能为基础的性能指数
R_0	吸收的能量传递到电子链末端的量子产率

2 结 果

2.1 不同磷质量浓度对多甲藻生长的影响

在不同质量浓度无机磷培养下, 多甲藻的 OD 值随培养时间的增加而增加. 整个培养期间, 磷质量浓度为 0.005 mg/L 和 0.02 mg/L 的处理组与无磷条件相比差异无统计学意义. 而培养的第 11 d 开始, 0.1 mg/L 和 0.6 mg/L 处理组的 OD 值高于无磷处理组(图 1).

2.2 磷对叶绿素荧光诱导动力学曲线(O-J-I-P)的影响

在不同质量浓度磷的培养下, 多甲藻的 OJIP 曲线的变化如图 2. 培养于 0.6 mg/L 磷下的多甲藻的相对可变荧光没有显著变化, 与 0.6 mg/L 磷培养条件下的多甲藻荧光相比, 培养于 $0, 0.005\text{ mg/L}$, 0.02 mg/L 和 0.1 mg/L 下的多甲藻 OJIP 曲线的 J 点均升高. 虽然不同磷质量浓度下的 OJIP 曲线有差异, 但其 O, J, I 和 P 四相均存在.

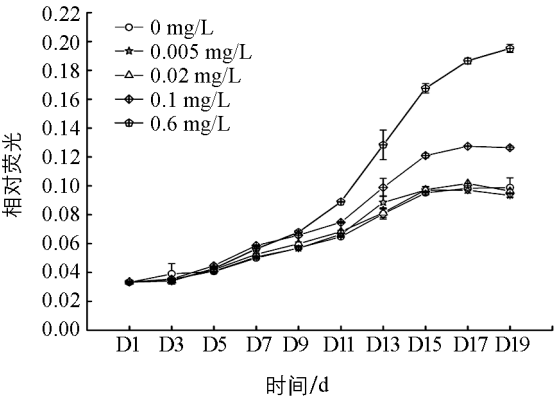


图 1 不同磷质量浓度对多甲藻生长的影响

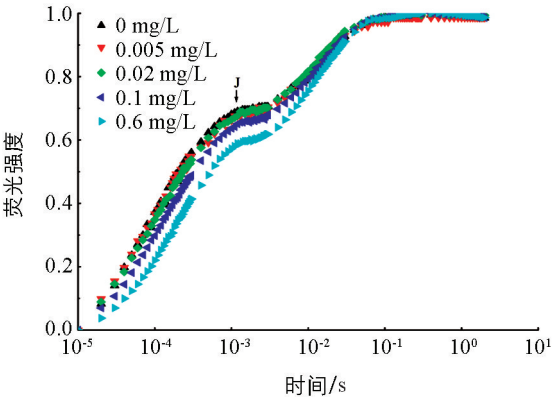


图 2 不同磷质量浓度下多甲藻 OJIP 曲线的变化

2.3 叶绿素荧光参数分析(JIP-test)

2.3.1 磷质量浓度对多甲藻 $F_0, F_m, F_v, F_v/F_0$ 和 F_v/F_m 的影响

随着磷质量浓度的增加, $F_0, F_m, F_v, F_v/F_0$ 和 F_v/F_m 均增加, 但与无磷条件相比, 低磷环境

(0.005 mg/L 和 0.02 mg/L)培养下的多甲藻的荧光参数差异无统计学意义,而富磷条件(0.1 mg/L 和 0.6 mg/L)下的荧光参数值则显著高于无磷条件($p<0.05$)(图 3).

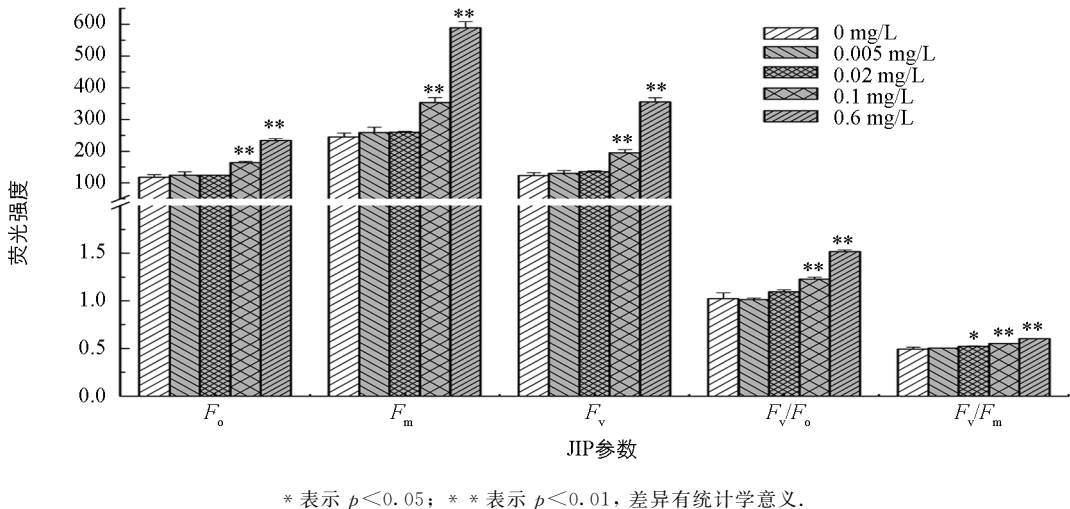


图 3 不同质量浓度磷对多甲藻 F_0 , F_m , F_v , F_v/F_0 和 F_v/F_m 的影响

2.3.2 不同磷质量浓度对单位反应中心能量流动的影响

随着磷质量浓度的增加, DI_0/RC 逐渐降低, 与无磷条件相比, 磷质量浓度为 0.02, 0.1 和 0.6 mg/L 时差异有统计学意义, DI_0/RC 分别降低了 18.8%, 29.8% 和 46.2%, 磷质量浓度为 0.005 mg/L 时差异无统计学意义. TR_0/RC 的变化趋势与 DI_0/RC 相似, 随着磷质量浓度的增加而降低, 且磷质量浓度为 0.02, 0.1 和 0.6 mg/L 时差异有统计学意义, 分别降低了 12.2%, 15.1% 和 19.5%. RE_0/RC 与 DI_0/RC 和 TR_0/RC 变化趋势相反, 随着磷质量浓度的增加而增加, 并且与无磷条件相比, 富磷条件下差异有统计学意义, 而低磷条件差异无统计学意义(图 4).

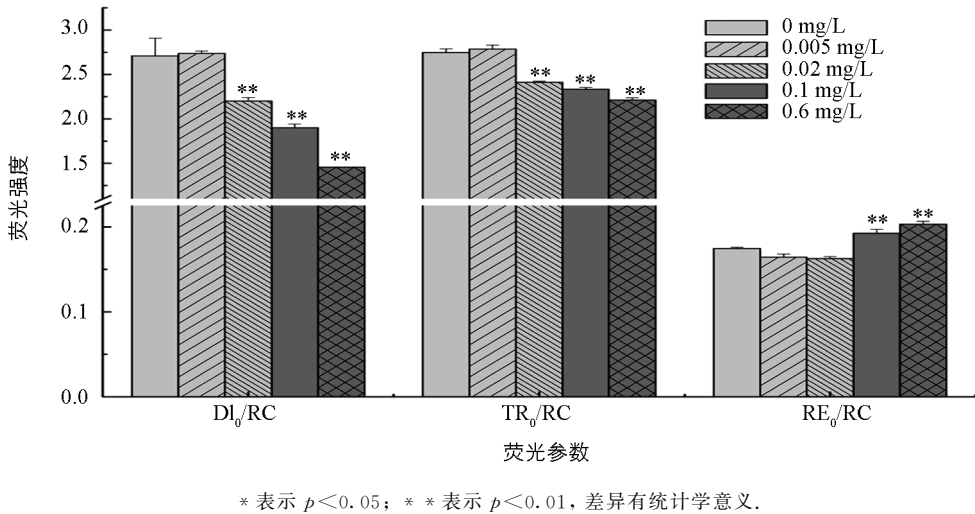


图 4 不同质量浓度磷对多甲藻 DI_0/RC , TR_0/RC 和 RE_0/RC 的影响

2.3.3 不同磷质量浓度对单位反应面积能量流动的影响

随着磷质量浓度的增加, ABS/CS_0 , DI_0/CS_0 , TR_0/CS_0 , ET_0/CS_0 , RE_0/CS_0 均增加. 与无磷条件相比, 低磷条件下各荧光参数差异无统计学意义($p>0.05$), 而富磷条件下的荧光参数差异有统计学意义($p<0.05$). 与无磷条件相比, 两个富磷条件下的 ABS/CS_0 分别增加了 35.5% 和 93.4%; DI_0/CS_0 分别增加了 24.9% 和 63.4%; TR_0/CS_0 分别增加了 56% 和 149.3%; ET_0/CS_0 分别增加了 73.4% 和 208.3%; RE_0/CS_0 分别增加了 80% 和 216%(图 5).

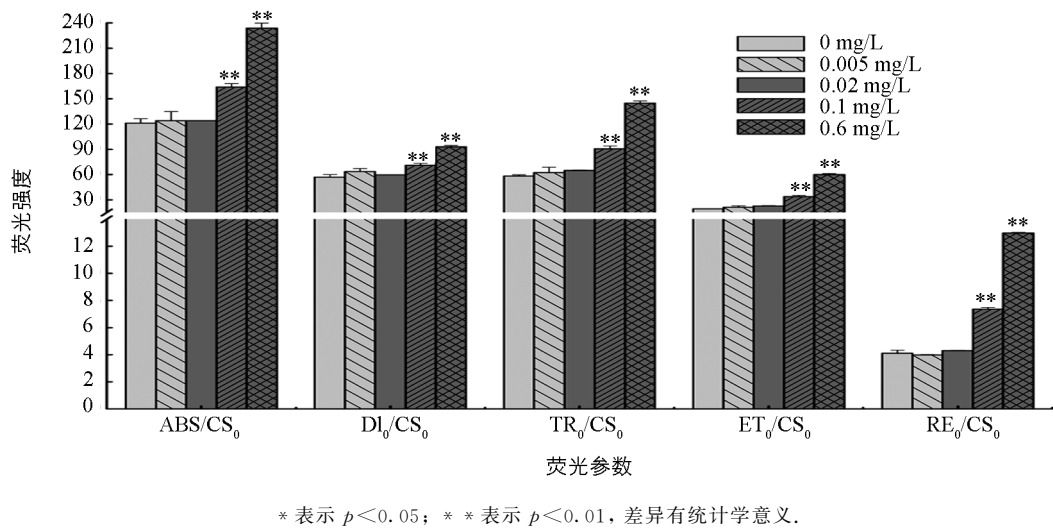


图 5 不同质量浓度磷对多甲藻 ABS/CS_0 , DI_0/CS_0 , TR_0/CS_0 , ET_0/CS_0 和 RE_0/CS_0 的影响

2.3.4 不同磷质量浓度对 V_J , S_m , PI_{ABS} 和 R_0 的影响

不同磷质量浓度下 V_J , S_m , PI_{ABS} , R_0 的变化如表 3. 随着磷质量浓度的增加, V_J 逐渐降低. 与无磷条件相比, 磷质量浓度为 0.005 mg/L 时, V_J 无显著变化, 而当磷质量浓度为 0.02 mg/L 或大于 0.02 mg/L 时, V_J 显著降低. S_m , PI_{ABS} 和 R_0 均随着磷质量浓度的增加而增加. 与无磷质量浓度相比, 富磷条件下的荧光参数显著增高, 而低磷条件下差异无统计学意义.

表 3 不同质量浓度磷对多甲藻 V_J , S_m , PI_{ABS} 和 R_0 的影响

磷质量浓度/(mg · L ⁻¹)	V_J	S_m	PI_{ABS}	R_0
0	0.665±0.010	8.154±0.36	0.097±0.012	0.031 4±0.002
0.005	0.663±0.003	7.863±0.46	0.093±0.003	0.031 2±0.002
0.02	0.647±0.005*	8.212±0.32	0.13±0.004**	0.034 6±0.000
0.1	0.627±0.002**	9.194±0.14	0.173±0.006**	0.045 4±0.000**
0.6	0.583±0.003**	10.469±0.28**	0.295±0.002**	0.055 5±0.001**

* 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

3 讨 论

有研究表明磷能影响微藻的生长速率和光合作用^[17-18], 当磷质量浓度过低时, 微藻的生长会受到严重抑制^[19], 我们的研究结果也支持了这一结论(图 1). 说明多甲藻的生长与磷质量浓度有直接的关系.

通过 O-J-I-P 荧光动力学分析可以得出各种指示光合系统 II 能量分布、吸收、诱捕、耗散等参数及电子传递状况^[16]. 在正常生理条件下, 典型的快速叶绿素荧光诱导动力学曲线记录了从 F_0 到 F_m 的整个荧光变化过程, 即 O, J, I 和 P 四相^[20-21]. 在本研究中, 与超富磷处理组(0.6 mg/L)相比, 其余磷处理组的 J 点均上升, 说明低磷条件下, 多甲藻的电子传递受到一定程度的抑制.

F_0 代表初始荧光, 是不参与光化学反应的光能辐射部分, 其与叶绿素浓度有关^[22-23]. F_m 和 F_v 分别表示最大荧光(光合系统 II 反应中心原初电子受体全部还原时的荧光)和可变荧光(参与光化学反应的光能辐射部分)^[22]. 在荧光的测定中, F_v/F_0 可反映 PSII 活性, 而 F_v/F_m 可代表 PSII 光化学的最大效率^[24]. 植物体内磷的质量浓度会影响其光能转换和利用^[25-26]. 研究表明^[17], 当藻细胞遭受磷限制时, F_v/F_m 会明显降低, 其可能原因是低磷条件限制了藻细胞的光合磷酸化, 降低了卡尔文循环效率, 进而导致光合速率降低^[27]. 本研究发现随着磷质量浓度的增加, F_0 , F_m , F_v , F_v/F_0 和 F_v/F_m 逐渐增加(图 3), 表明磷质量

浓度增加,多甲藻受激发的电子密度增加,用于进行有效光化学反应的光合辐射增加,进而导致多甲藻的光合效率增强,多甲藻生长速率增快.而无磷和低磷处理下多甲藻电子传递受阻,受到光合抑制.

植物在进行光合作用时,吸收的光能大部分用于光化学反应和光合能量的转换,只有少部分以热和叶绿素荧光等方式散失掉.一旦植物受到胁迫,其光化学反应降低,吸收的光能则更多以热和荧光形式损失掉^[28-29].本研究发现,与高磷处理组相比,无磷与低磷处理组的荧光参数 RE_0/RC , ABS/CS_0 , DI_0/CS_0 , TR_0/CS_0 , ET_0/CS_0 , RE_0/CS_0 和 R_0 均显著降低,而 DI_0/RC 和 TR_0/RC 显著升高(图 4,图 5).说明在无磷和低磷处理下,多甲藻光合系统 II 中有活性反应中心的数量及单位面积吸收的光能减少,而用于还原 Q_A 的能量增加,使得单位面积电子传递产额降低,传递到电子链末端的能量也降低,进而导致整个光合电子传递影响.此外,无磷和低磷处理组中 DI_0/RC 的升高,进一步说明单位反应中心耗散掉的能量增加,而用于光化学反应的能量相应减少,光能有效利用率降低,导致光合作用受抑制.相反,在高磷处理下,多甲藻热耗散降低,并且用于电子传递的能量增加,使得光能利用率增加,光合效率增大.

V_J 是指光照 2 ms 时有活性的反应中心关闭程度^[16]. S_m 则表示 Q_A 全部被还原时所需要的能量,即 PSII 受体侧 PQ 库的大小,电子从 Q_A^- 进入电子传递链越多, S_m 的值就越大^[16].由表 3 可以看出,在无磷和低磷处理条件下, V_J 和 S_m 显著低于高磷处理组,说明磷限制使得 RC 的数量减少,获得的能量较少用于电子传递而更多用于还原 Q_A ,从而抑制了 Q_A 到 Q_B 的电子传递,造成 Q_A^- 大量积累,降低了 PQ 库容量^[30], J 点升高^[31]. PI_{ABS} 是反映基于光能吸收的性能指数,因此能很好地表征植物光合结构的状态^[32-33]. PI_{ABS} 随着磷质量浓度的降低而降低(表 3),表明磷的降低,影响了多甲藻的光合结构.

综上所述,在不同无机磷质量浓度处理下,高磷处理显著提升了多甲藻的光合效率,而无磷和低磷处理则显著抑制了光合电子传递,降低了光合效率.因此,随着水体磷质量浓度的升高,多甲藻的光合效率增加,将促使其生物量的增加,为其水华的发生提供前提条件.

参考文献:

- [1] 张琪, 缪荣丽, 刘国祥, 等. 淡水甲藻水华研究综述 [J]. 水生生物学报, 2012, 36(2): 352—360.
- [2] 周名江, 于仁成. 有害赤潮的形成机制、危害效应与防治对策 [J]. 自然杂志, 2007, 29(2): 72—77.
- [3] 边归国, 陈宁, 胡征宇, 等. 福建某河流甲藻水华与污染指标的关系 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 405—410.
- [4] 孙育平, 游江涛, 雷腊梅, 等. 黄龙带水库甲藻水华的脂肪酸组成特征 [J]. 生态科学, 2008, 27(5): 394—397.
- [5] 洪尚波, 吴光应, 万丹, 等. 三峡水库大宁河春季水华藻类分布及影响因子 [J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 80—84.
- [6] FUKUJU S, TAKAHASHI T, KAWAYOKE T. Statistical Analysis of Freshwater Red Tide in Japanese Reservoirs [J]. Water Science & Technology, 1998, 37(2): 203—210.
- [7] CANTONATI M, TARDIO M, TOLOTTI M, et al. Blooms of the Dinoflagellate *Glenodinium Sanguineum* Obtained During Enclosure Experiments in Lake Tovel (N. Italy) [J]. Journal of Limnology, 2003, 62(1): 79—87.
- [8] GOLDMAN J C, MCCARTHY J J, PEAHEY D G. Growth Rate Influence on the Chemical Composition of Phytoplankton in Oceanic Waters [J]. Nature, 1979, 279(5710): 210—215.
- [9] BEARDALL J, YOUNG E, ROBERTS S. Approaches for Determining Phytoplankton Nutrient Limitation [J]. Aquatic Sciences, 2001, 63(1): 44—69.
- [10] DYHRMAN S T, AMMERMAN J W, VAN-MOOY B. Microbes and the Marine Phosphorus Cycle [J]. Oceanography, 2007, 20(2): 110—116.
- [11] CRAWFORD N M. Nitrate: Nutrient and Signal for Plant Growth [J]. Plant Cell, 1995, 7(7): 859—868.
- [12] HECKY R E, KILHAM P. Nutrient Limitation of Phytoplankton in Freshwater and Marine Environments: A Review of Recent Evidence on the Effects of Enrichment [J]. Limnology and Oceanography, 1988, 33(4): 796—822.

- [13] 段 宇,田永强,莫 钰,等. 厦门周边水库浮游植物碱性磷酸酶活性研究 [J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 20—24.
- [14] SPEARS B M, CARVALHO L, DUDLEY B, et al. Variation in Chlorophyll a to Total Phosphorus Ratio Across 94 UK and Irish Lakes: Implications for Lake Management [J]. Journal of Environmental Management, 2013, 115(3): 287—294.
- [15] VENKATESH J, UPADHYAYA C P, YU J W, et al. Chlorophyll a Fluorescence Transient Analysis of Transgenic Potato Overexpressing D-Galacturonic Acid Reductase Gene for Salinity Stress Tolerance [J]. Horticulture Environment and Biotechnology, 2012, 53(4): 320—328.
- [16] 李鹏民,高辉远,STRASSER R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用 [J]. 植物生理学与分子生物学学报, 2005, 31(6): 559—566.
- [17] BEARDALL J, BERMAN T, HERAUD P, et al. A Comparison of Methods for Detection of Phosphate Limitation in Microalgae [J]. Aquatic Sciences, 2001, 63(1): 107—121.
- [18] SEBASTIAN L, FRAMPTON D M F, BLACKBURN S I, et al. Influence of Phosphorus Limitation on Toxicity and Photosynthesis of *Alexandrium Minutum* (Dinophyceae) Monitored by in-Line Detection of Variable Chlorophyll Fluorescence1 [J]. Journal of Phycology, 2003, 39(2): 320—331.
- [19] 宋丽娜,郑晓宇,顾詠洁,等. 磷浓度对海洋小球藻叶绿素荧光及生长的影响 [J]. 环境污染与防治, 2010, 32(8): 20—24.
- [20] STIRBET A, GOVINDJEE. Chlorophyll a Fluorescence Induction: a Personal Perspective of the Thermal Phase, the J-I-P Rise [J]. Photosynthesis Research, 2012, 113(1—3): 15—61.
- [21] SRIVASTAVA A, STRASSER R J. Stress and Stress Management of Land Plants During a Regular Day [J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 148(3): 445—455.
- [22] 朱延姝,于丽姣,樊金娟,等. 玉米幼苗叶片叶绿素荧光参数变化规律研究 [J]. 河南农业科学, 2011, 40(6): 36—38.
- [23] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论 [J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444—448.
- [24] 赵丽英,邓西平,山 仑. 渗透胁迫对小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1261—1264.
- [25] PLESNICAR M, KASTORI R, PETROVIC N, et al. Photosynthesis and Chlorophyll Fluorescence in Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Leaves as Affected by Phosphorus Nutrition [J]. Journal of Experimental Botany, 1994, 45(7): 919—924.
- [26] 李绍长,胡昌浩,龚 江,等. 低磷胁迫对磷不同利用效率玉米叶绿素荧光参数的影响 [J]. 作物学报, 2004, 30(4): 365—370.
- [27] 梁 英,金月梅,田传远. 氮磷浓度对绿色巴夫藻生长及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2008(1): 120—128.
- [28] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll Fluorescence—a Practical Guide [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345): 659—668.
- [29] CONSALVEY M, PERKINS R G, PATERSON D M, et al. PAM Fluorescence: a Beginners Guide for Benthic Diatomists [J]. Diatom Research, 2005, 20(1): 1—22.
- [30] STRASSER B J. Donor Side Capacity of Photosystem II Probed by Chlorophyll a Fluorescence Transients [J]. Photosynthesis Research, 1997, 52(2): 147—155.
- [31] NI L X, ACHARYA K, HAO X Y, et al. Effects of Artemisinin on Photosystem II Performance of *Microcystis aeruginosa* by in Vivo Chlorophyll Fluorescence [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 89(6): 1165—1169.
- [32] 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.

- [33] HEERDEN P D R V, TSIMILLI-MICHAEL M, KRÜGER G H J, et al. Dark Chilling Effects on Soybean Genotypes During Vegetative Development: Parallel Studies of CO₂ Assimilation, Chlorophyll a Fluorescence Kinetics O-J-I-P and Nitrogen Fixation [J]. *Physiologia Plantarum*, 2003, 117(4): 476—491.

Effect of Inorganic Phosphorus on the Growth and Chlorophyll Fluorescence of *Peridinium umbonatum*

YANG Yan-jun¹, XU Jin-zhu², WU Zhong-xing¹, WU Xing-hua¹

1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education)/Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Wansheng Environmental Protection Bureau, Wansheng Chongqing 400800, China

Abstract: Phosphorus is usually considered as a key limiting factor on algae growth, because it has a great effect on the growth and photosynthesis of algae. *Peridinium umbonatum* is a common bloom-forming species of freshwater dinoflagellates, but few studies are devoted to the understanding of the effect of phosphorus on it. In this study, *P. umbonatum* was cultured at different concentrations of inorganic phosphorus in order to explore the influences of phosphorus on its growth and chlorophyll fluorescence. The results indicated that the value of *OD* was enhanced with the increase of inorganic phosphorus concentration. After 11-day culture, *OD* in *P. umbonatum* at 0.1 and 0.6 mg/L phosphorus was significantly higher than that in the treatments at no and low phosphorus ($p < 0.05$). The chlorophyll fluorescence kinetics parameters showed that no significant differences existed between the treatments of 0.005 mg/L or 0.02 mg/L and 0 mg/L in DI_0/RC , TR_0/RC , RE_0/RC , ABS/CS_0 , DI_0/CS_0 , TR_0/CS_0 , ET_0/CS_0 , RE_0/CS_0 and R_0 , while significant differences were detected between no-P and the treatments of ≥ 0.1 mg/L in these parameters ($p < 0.05$). These results suggested that rich phosphorus significantly promoted the growth and photosynthesis of *P. umbonatum*, while no and low phosphorus had a negative influence on it. This also implied that the changes of phosphorus concentration might affect the formation and process of *Peridinium* blooms.

Key words: *Peridinium umbonatum*; inorganic phosphorus; growth; chlorophyll fluorescence; JIP-test

责任编辑 周仁惠

