

# 镧浸种处理对玉米光合特性的影响

张 舜<sup>1</sup>, 廖 颖<sup>1</sup>, 陶宗娅<sup>1\*</sup>, 罗学刚<sup>2</sup>, 吴 国<sup>1</sup>

(1.四川师范大学, 成都 610101; 2.西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:**为了探索镧对玉米光合特性的影响,采用露天盆栽方法,以氯化镧( $\text{LaCl}_3$ )溶液浸种处理玉米种子,测定大喇叭口期玉米叶片光合日变化、光响应曲线和  $\text{CO}_2$  响应曲线及 PEP 羧化酶(PEPCase)活性。结果表明,高( $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )低( $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )两个  $\text{La}^{3+}$ 溶液浓度条件下,玉米叶片光合午休现象得到缓解,气孔因素是主要原因; $\text{La}^{3+}$ 溶液浸种处理后,表观量子效率( $AQY$ )和光饱和点( $LSP$ )显著提高,羧化效率( $CE$ )降低, $\text{La}^{3+}$ 对 PEPCase 有明显的抑制作用。说明  $\text{La}^{3+}$ 溶液浸种预处理主要是通过提高植株对光能的利用来提高玉米叶片的光合效率。

**关键词:**玉米(*Zea mays* L.);  $\text{La}^{3+}$ ; 表观量子效率; 羧化效率; PEP 羧化酶

**中图分类号:**X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)05-0830-06

## Effects of Lanthanum with Which Soaked Seeds on Photosynthetic Characteristics in Maize

ZHANG Shun<sup>1</sup>, LIAO Ying<sup>1</sup>, TAO Zong-ya<sup>1\*</sup>, LUO Xue-gang<sup>2</sup>, WU Guo<sup>1</sup>

(1.Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; 2.Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Effects of lanthanum on photosynthetic characteristics in maize were studied which seeds soaked with  $\text{LaCl}_3$  solution of  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  and  $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  concentrations and sowed in pots, the experiment in the open air, based on measurements of photosynthetic gas exchange parameters, diurnal variations of photo synthesis, light intensity-photosynthetic rate response curves,  $\text{CO}_2$  concentrations-photosynthetic rate response curves and PEPCase activities at spike formation stage by using CIRAS- II portable photosyntometer and spectrophotometer-meter, fitted the curve by the modified model of rectangular hyperbola, extraction of feature parameters. The results showed that the net photosynthetic rate( $P_n$ ) at midday were increased significantly and “midday depress” attributed mainly to stoma factor were relieved by treated seeds with  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  solution. Under treatments of the seeds soaked with  $\text{LaCl}_3$  solution, the apparent quantum yield( $AQY$ ), light saturation point ( $LSP$ ) and the light compensation point( $LCP$ ) were improved significantly, but PEPCase activities,  $\text{CO}_2$  saturation point( $CSP$ ), and carboxylation efficiency( $CE$ ) were decreased. It was suggested that effects of lanthanum with which soaked the seedes could increase photosynthetic efficiency in maize leaves which mainly attributed to improving the use of light energy, but the use of external  $\text{CO}_2$  were prejudiced, widespread use of rare earth in agriculture still has well prospects for development.

**Keywords:** maize(*Zea mays* L.);  $\text{La}^{3+}$ ; apparent quantum yield; carboxylation efficiency; PEPCase

稀土元素一般是指镧系元素(15种)和与镧系元素化学性质相似的钪、钇共17种元素的总称。我国是世界上稀土资源比较丰富的国家,人们已对稀土进行了大量有意义的研究,从不同层次和不同角度为稀土微肥的研发应用提供了理论和实践依据<sup>[1-2]</sup>。

随着稀土在农业生产上的推广应用,稀土的植物

生物学效应及其对环境的影响受到广泛关注<sup>[3]</sup>。研究发现,稀土的增产效应与稀土可提高叶绿素含量有密切关系<sup>[4-7]</sup>。谢祖彬等<sup>[8]</sup>用分根营养液培养法研究镧对水稻生长及其促进作用的生理机制,发现稀土处理能够增加叶片中赤霉素和吲哚乙酸的含量。稀土可提高甘蔗叶绿体循环和非循环光合磷酸化活力、光合电子传递与ATP形成的偶联程度比,以及光合磷酸化偶联因子CF1活力,影响光系统II(PSII)颗粒的放氧活性<sup>[9]</sup>。氯化铈可使叶绿素含量提高40%,并影响原叶绿体中PSI和PSII的发育,延缓657nm状态叶绿素的衰变过程,加速黄化幼苗转绿的进程<sup>[10]</sup>。稀土处

收稿日期:2010-11-09

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAB18B08-01);四川省教育厅重点项目(07ZA089)

作者简介:张 舜(1984—),男,湖北随州人,硕士研究生,主要从事植物光合碳同化机理研究。E-mail:sxdxyjszs@163.com

\* 通讯作者:陶宗娅 E-mail:t89807596@yahoo.com.cn

理叶片的 Hill 反应活性明显提高,叶绿体中光照引起的 PQ 穿梭加速,说明水的光解、光能转换、电子传递速率加快,这是由于蛋白复合体活性加强和光合电子传递的速率加快,从而带动了整个光能转换和光化学反应。李赛君等<sup>[1]</sup>在甲醇和醋酸溶液中合成得到了绿色叶绿素镧复合物,与离体叶绿素的 UV-Vis 吸收光谱比较,稀土-叶绿素复合物在 430 nm 处的吸收峰发生紫移,这意味着稀土有利于植物吸收波长更短的辐射能,为光合作用提供更多的能量。

诸多研究表明,稀土对植物光合作用过程存在着某种调控机制<sup>[12-13]</sup>,但此前的研究大多采用离体试材。本文采用盆栽玉米结合稀土镧溶液浸种的方法,通过分析不同浓度镧溶液浸种处理对玉米单叶光合特性、碳同化关键酶 PEP 羧化酶(PEPCase)的影响,探究镧离子对玉米光合特性影响的机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 试材

玉米(*Zea mays* L.)种子(品种为川单 21 号)购自成都市金禾种子公司,氯化镧( $\text{LaCl}_3$ )为分析纯。

实验于 2009—2010 年在四川师范大学进行,露天盆栽(盆口直径 38 cm,盆高 40 cm),每盆装土 19 kg,三叶期时定植每盆 4 株,盆间距 50 cm,每批处理 60 盆,重复 3 次。

首先将玉米种子用 0.1%  $\text{HgCl}_2$  消毒 10 min,蒸馏水、去离子水冲洗数次,再用浓度为 0、60、120  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{LaCl}_3$  溶液浸种 24 h,取出风干后播种,常规管理。玉米生长到小喇叭口期(6~10 片全展叶),进行光合参数与酶活性测定。

### 1.2 光合日变化的测定

采用 CIRAS-II 型光合测定仪(美国 PPS 公司和英国汉莎公司出品),选择晴朗、无云的天气和开放式气路系统,在自然光条件下测定<sup>[14-15]</sup>,测定参数包括光合有效辐射( $\text{PAR}/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、净光合速率( $P_n/\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、蒸腾速率( $E/\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、气孔导度( $G_s/\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、胞间隙  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i/\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )等。测定时间为 6:00 至 18:00,每隔 2 h 测定 1 次,重复 4 次。

### 1.3 $\text{PAR}-P_n$ 响应曲线的测定

选择晴朗天气,将玉米植株进行充分的光适应,采用开放式气路系统和人工红蓝光源,按照光强 1 500、1 200、1 000、800、600、500、400、300、200、100、50、0  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的顺序,测定气体交换参数,重复 3 次。

### 1.4 $C_i-P_n$ 响应曲线的测定

选择晴朗天气,首先将玉米植株进行充分的光适应,采用闭合式气路系统、人工红蓝光源和  $\text{CO}_2$  钢瓶,按照  $\text{CO}_2$  浓度 0、50、100、200、300、500、700、900、1 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  的顺序,测定气体交换参数,重复 3 次。

### 1.5 PEPCase 活性的测定

磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPCase)活性测定采用李明军的方法<sup>[16]</sup>,读取总体积为 3 mL 酶反应混合体系在反应开始 30 s 后、3 min 内吸光度的降低值,酶活性以每分钟每毫升酶液氧化 NADH 的量( $\text{nmol} \cdot \text{mL}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )表示。

### 1.6 数据处理与分析

#### 1.6.1 拟合模型与分析

按照叶子飘等<sup>[17-21]</sup>的模型进行曲线拟合。 $\text{PAR}-P_n$  响应曲线的数学表达式为:

$$P_n(I) = \alpha \cdot I \cdot (1 - \beta \cdot I) / (1 + \gamma \cdot I) - R_d$$

式中: $P_n$  为净光合速率; $I$  为光强; $\alpha$  为  $I=0$  时  $\text{PAR}-P_n$  响应曲线的初始斜率即初始量子效率; $\beta$  为修正系数; $\gamma = \alpha/P_{\max}$ ,  $P_{\max}$  为最大净光合速率; $R_d$  是暗呼吸速率。

$C_i-P_n$  响应曲线的数学表达式为:

$$P_n(C_i) = \alpha \cdot C_i \cdot (1 - \beta \cdot C_i) / (1 + \gamma \cdot C_i) - R_p$$

式中: $R_p$  为光呼吸速率; $\alpha$  为初始羧化效率;其他参数含义同  $\text{PAR}-P_n$  响应曲线。

#### 1.6.2 数据分析

采用 SPSS15.0 软件对数据进行方差分析,利用光合响应模型计算与对应光强和对应  $\text{CO}_2$  浓度匹配的光合速率预测值及相应的光合参数。用直线方程分别拟合弱光强( $\leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )条件下的光响应数据以求解表观量子效率(AQY)和低  $\text{CO}_2$  浓度( $\leq 200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )条件下的  $\text{CO}_2$  响应数据以求解羧化效率(CE)。绘图采用 Excel 和 SigmaPlot 10.0 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 $P_n$ 日变化

$P_n$  日变化可以作为反映外界因素影响植物生长和代谢的重要依据。由图 1 可见, $\text{PAR}$  在一日内的变化呈单峰型,早上 6:00 后光强开始上升,中午到达峰值,午后持续下降。 $P_n$  的变化却不同,对照(CK)  $P_n$  的日变化呈双峰型,第一个峰值出现在 10:00 左右,约 12:00 时出现低谷, $P_n$  值较 10:00 时下降了 9.51%,随后  $P_n$  值又有一定程度的回升,14:00 左右时出现第二个峰值,之后逐渐递降,这种午间  $P_n$  降低的现象

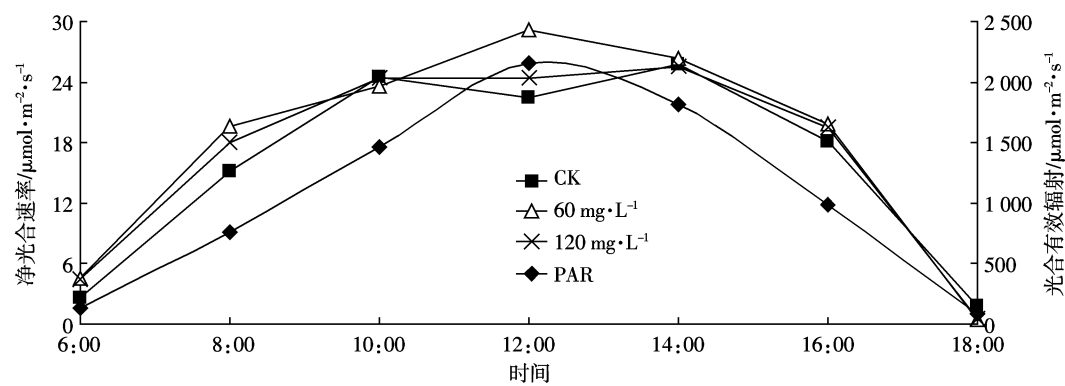


图 1 玉米叶片净光合速率日变化  
Figure 1 Diurnal changes of net photosynthetic rate(*P<sub>n</sub>*) in maize

即为光合“午休”。

研究表明,“午休”的原因很多<sup>[22-23]</sup>。许大全等<sup>[23]</sup>提出,引起植物光合“午休”的自身因素不外乎气孔部分关闭和植物细胞自身活性的下降,前者导致 *C<sub>i</sub>* 值下降,后者则表现为 *C<sub>i</sub>* 值上升。

由表 1 可以看出,当 CK 组 *P<sub>n</sub>* 在 10:00 时达到第一个峰值后,伴随其 *P<sub>n</sub>* 在午间的一个下降过程,其气孔导度、胞间 *CO<sub>2</sub>* 浓度 *C<sub>i</sub>* 也呈下降的趋势,这表明 CK 组叶片午间 *P<sub>n</sub>* 下降的原因主要是由气孔限制引起的。经 60 mg·L<sup>-1</sup> La<sup>3+</sup> 溶液浸种处理的玉米叶片 *P<sub>n</sub>* 在 12:00 时达到一日内的最大值(表 1),与其他时间段相比较差异显著(*P*<0.05),表明低浓度 La<sup>3+</sup> 具有很好的缓解光合“午休”的作用。而经 120 mg·L<sup>-1</sup> La<sup>3+</sup> 溶

液浸种处理的叶片 *P<sub>n</sub>* 在 10:00—14:00 时并无显著性差异,但也能够缓解叶片光合“午休”现象。

气孔导度 *GS* 是表现植物气孔传导 *CO<sub>2</sub>* 和水汽能力强弱的指标,植物可以通过改变气孔导度的方式控制与外界 *CO<sub>2</sub>* 和水汽的交换,进而调节光合速率。表 1 可见,CK 组叶片气孔导度在 12:00 时显著下降;经 La<sup>3+</sup> 溶液浸种处理后,其气孔导度在一天内无显著性变化,从而避免了午间光合有效辐射升高而导致的气孔导度下降的情况出现。胞间隙 *CO<sub>2</sub>* 浓度 *C<sub>i</sub>* 和蒸腾速率 *E* 与 CK 组一致,午间并无显著性变化。

2.2 *PAR-P<sub>n</sub>* 响应曲线和 *C<sub>i</sub>-P<sub>n</sub>* 响应曲线

光响应模型和 *CO<sub>2</sub>* 响应模型是现代植物光合作用研究的热点之一。光响应模型(或光响应曲线)研究

表 1 不同 La<sup>3+</sup> 浓度浸种处理下玉米光合参数日变化

| Table 1 Diurnal variation of photosynthetic parameters in corn which seeds soaked with different concentrations solution of LaCl <sub>3</sub> for 24 h |       |                                                                   |                                                                 |                                                                           |                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 处理浓度/mg·L <sup>-1</sup>                                                                                                                                | 时间    | 净光合速率 <i>P<sub>n</sub></i> /μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | 气孔导度 <i>G<sub>s</sub></i> /mol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | 胞间隙 <i>CO<sub>2</sub></i> 浓度 <i>C<sub>i</sub></i> /μmol·mol <sup>-1</sup> | 蒸腾速率 <i>E</i> /mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> |
| 0(CK)                                                                                                                                                  | 8:00  | 15.133±1.871b                                                     | 193.333±13.016c                                                 | 110.000±10.535b                                                           | 3.840±0.040c                                         |
|                                                                                                                                                        | 10:00 | 24.567±1.387a                                                     | 337.000±8.185a                                                  | 115.333±7.468b                                                            | 6.560±0.191a                                         |
|                                                                                                                                                        | 12:00 | 22.433±2.836ab                                                    | 259.000±10.880b                                                 | 101.000±5.440b                                                            | 7.127±0.381a                                         |
|                                                                                                                                                        | 14:00 | 25.800±2.536a                                                     | 219.667±12.884bc                                                | 120.667±9.604b                                                            | 6.530±0.545a                                         |
|                                                                                                                                                        | 16:00 | 18.100±2.124ab                                                    | 212.000±6.220bc                                                 | 205.000±5.650a                                                            | 5.153±0.594b                                         |
| 60                                                                                                                                                     | 8:00  | 19.633±1.206c                                                     | 356.000±18.357a                                                 | 117.667±7.572b                                                            | 4.893±0.248b                                         |
|                                                                                                                                                        | 10:00 | 23.600±1.473b                                                     | 312.000±16.453a                                                 | 91.333±5.693b                                                             | 6.790±0.387a                                         |
|                                                                                                                                                        | 12:00 | 29.167±2.458a                                                     | 283.000±11.022a                                                 | 92.667±7.364b                                                             | 7.110±0.556a                                         |
|                                                                                                                                                        | 14:00 | 26.400±2.265ab                                                    | 267.000±16.091a                                                 | 135.333±10.369b                                                           | 6.637±0.221a                                         |
|                                                                                                                                                        | 16:00 | 19.800±1.200c                                                     | 265.000±13.614a                                                 | 179.667±5.218a                                                            | 5.816±0.864ab                                        |
| 120                                                                                                                                                    | 8:00  | 18.067±1.501b                                                     | 282.333±17.134a                                                 | 118.333±6.110ab                                                           | 4.420±0.468b                                         |
|                                                                                                                                                        | 10:00 | 24.433±1.620a                                                     | 337.667±16.571a                                                 | 109.000±5.524b                                                            | 6.233±0.596a                                         |
|                                                                                                                                                        | 12:00 | 24.533±1.701a                                                     | 227.000±17.149a                                                 | 105.333±9.609b                                                            | 6.376±0.682a                                         |
|                                                                                                                                                        | 14:00 | 25.533±1.450a                                                     | 236.333±16.436a                                                 | 132.000±5.600ab                                                           | 6.206±0.695a                                         |
|                                                                                                                                                        | 16:00 | 18.933±1.379b                                                     | 202.667±14.747a                                                 | 161.667±7.428a                                                            | 4.940±0.728ab                                        |

注:表中同列同一浓度内不同字母表示达到 5%显著水平(*P*<0.05),下同。

$P_n$  与  $PAR$  之间的关系,由光响应曲线可以确定植物的光补偿点、光饱和点、表观量子效率和最大光合速率等参数; $CO_2$  响应模型(或  $CO_2$  响应曲线)研究  $P_n$  与  $C_i$  之间的关系,由  $CO_2$  响应曲线可以确定植物的  $CO_2$  补偿点、 $CO_2$  饱和点和羧化效率等参数。目前人们提出了不同的光响应经验模型,其中最常用的有直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数方程等; $CO_2$  响应的经验模型则有 Michaelis-Menten 模型和直角双曲线模型等,这些模型对研究植物光合作用反应过程有着重要的意义。

尽管人们已经建立了多种光响应模型,但还没有一个模型能够同时对弱光和强光下的光合动态变化进行拟合。例如,当采用直角双曲线模型、非直角双曲线模型进行拟合时,得到的最大光合速率远大于实测值,饱和光强则远小于实测值;而采用 Michaelis-Menten 模型对  $CO_2$  响应数据进行拟合时,存在估算的饱和  $CO_2$  浓度远小于实测值等问题。本研究采用了叶子飘构建的直角双曲线修正模型,该模型的特点是可以拟合植物在饱和光强之后  $P_n$  随光强增加而逐渐下降这一段的光响应曲线,弥补了诸多经验模型的不足,且估算的各种光合参数与实测值最为接近。

采用叶子飘的直角双曲线修正模型对实测数据进行拟合,得到的拟合点与实测值高度符合(相关系数  $R>0.998$ )。用获得的拟合值作图(图 2)可见,随着  $PAR$  的增加,叶片  $P_n$  也随之上升,当光强达到高水平后 ( $PAR>1\,500\,\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ ),CK 组叶片  $P_n$  开始降低,表现出明显的光抑制;而用两种不同浓度  $La^{3+}$  溶液浸种处理后,叶片  $P_n$  继续上升至较高水平,最大净光合速率显著提高 ( $P<0.05$ ),表明  $La^{3+}$  处理有利于增强玉米叶片利用强光的能力。但  $La^{3+}$  溶液浸种处理叶片对高浓度  $CO_2$  的利用能力略低于 CK 组(图 3)。

提取光响应拟合曲线的特征参数进行分析(表 2)可见,与 CK 组比较,低浓度  $La^{3+}$  溶液浸种显著提高了叶片表观量子效率(AQY)达 30.2%,两种  $La^{3+}$  浓度溶液浸种处理均显著提高了单叶最大光合能力(分别为 18.4%和 16.3%)和光饱和点(分别为 6.3%和 11.9%),

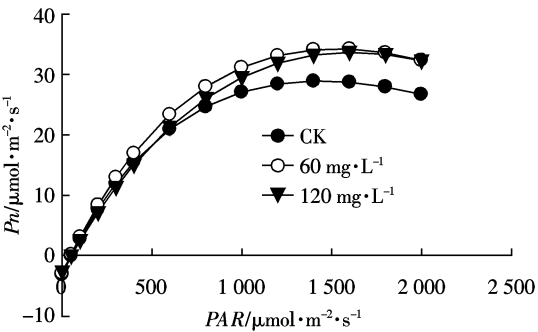


图 2 玉米的光响应曲线

Figure 2 Light-response curve of photosynthesis of *Zea mays*

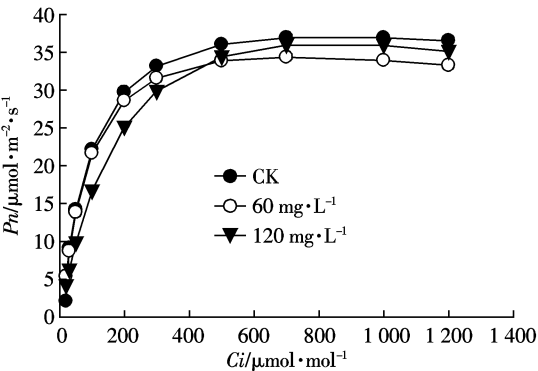


图 3 玉米的  $CO_2$  响应曲线

Figure 3  $CO_2$ -response curve of photosynthesis of *Zea mays*

表明稀土  $La^{3+}$  能够提高叶片对弱光和强光的利用能力。120  $mg\cdot L^{-1}$   $La^{3+}$  溶液处理后,叶片的 AQY 显著降低,说明低浓度  $La^{3+}$  溶液浸种处理的效果要优于高浓度  $La^{3+}$  溶液处理。

提取  $CO_2$  响应拟合曲线的特征参数进行分析(表 3)可见,用  $La^{3+}$  溶液浸种处理的叶片羧化效率( $CE$ )、最大净光合速率( $A_{max}$ )及  $CO_2$  饱和点( $CSP$ )均显著降低,低浓度  $La^{3+}$  处理显著提高了叶片光呼吸速率( $R_p$ , 47.4%)和  $CO_2$  补偿点( $CCP$ , 37.3%),表明外源  $La^{3+}$  降低了玉米叶片同化  $CO_2$  的能力,其固定  $CO_2$  的关键酶磷酸烯醇式丙酮羧化酶(PEPCase)的活性可能受到一定程度的抑制。高浓度  $La^{3+}$  处理的叶片  $R_p$  和  $CCP$  显著降低,暗示光合电子传递及同化低浓度  $CO_2$  的能力

表 2 不同  $La^{3+}$  浓度浸种处理下玉米  $PAR-P_n$  响应曲线特征参数

| Table 2 The parameters of $PAR-P_n$ response curves in corn which seeds soaked with different concentrations solution of $LaCl_3$ for 24 h |                 |                                                         |                                                   |                                                  |                                                  |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|
| $La^{3+}/$<br>$mg\cdot L^{-1}$                                                                                                             | 表观量子效率<br>$AQY$ | 最大净光合速率 $A_{max}/$<br>$\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ | 暗呼吸速率 $R_d/$<br>$\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ | 光补偿点 $LCP/$<br>$\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ | 光饱和点 $LSP/$<br>$\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ | 决定系数 $R^2$ |
| 0(CK)                                                                                                                                      | 0.043b          | 28.956c                                                 | 3.056a                                            | 45.670b                                          | 1 435.946c                                       | 0.998 3    |
| 60                                                                                                                                         | 0.056a          | 34.270a                                                 | 2.859b                                            | 48.902a                                          | 1 526.450b                                       | 0.999 7    |
| 120                                                                                                                                        | 0.041c          | 33.676b                                                 | 2.585c                                            | 49.880a                                          | 1 608.085a                                       | 0.999 4    |

表 3 不同 La<sup>3+</sup>浓度浸种处理下玉米叶片 Ci-Pn 响应曲线特征参数

| Table 3 The parameters of Ci-Pn response curves in corn which seeds soaked with different concentrations solution of LaCl <sub>3</sub> for 24 h |            |                                                                     |                                                                 |                                                    |                                                    |                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------|
| La <sup>3+</sup> /<br>mg·L <sup>-1</sup>                                                                                                        | 羧化效率<br>CE | 最大净光合速率 A <sub>max</sub> /<br>μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | 光呼吸速率 R <sub>p</sub> /<br>μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | CO <sub>2</sub> 补偿点 CCP/<br>μmol·mol <sup>-1</sup> | CO <sub>2</sub> 饱和点 CSP/<br>μmol·mol <sup>-1</sup> | 决定系数 R <sup>2</sup> |
| 0(CK)                                                                                                                                           | 0.135a     | 37.081a                                                             | 2.576b                                                          | 5.263b                                             | 842.241a                                           | 0.997 6             |
| 60                                                                                                                                              | 0.128b     | 34.435c                                                             | 3.798a                                                          | 7.227a                                             | 721.248b                                           | 0.997 1             |
| 120                                                                                                                                             | 0.103c     | 36.199b                                                             | 0.519c                                                          | 2.050c                                             | 833.505a                                           | 0.994 1             |

均受到抑制。

2.3 La<sup>3+</sup>对 PEPCase 活性的影响

PEPCase 是 C4 植物光合碳同化途径的关键酶之一,催化固定空气中的 CO<sub>2</sub> 形成原初产物。通过差异显著性分析,表明 La<sup>3+</sup>对玉米叶片 PEPCase 活性存在显著性影响( $P<0.05$ ),表现为 La<sup>3+</sup>对 PEPCase 活性具有显著的抑制作用(表 4),抑制率平均为28.1%,La<sup>3+</sup>浓度由 60 mg·L<sup>-1</sup> 提高到 120 mg·L<sup>-1</sup> 后,对 PEPCase 活性的抑制率增加了 13.7%。

表 4 不同 La<sup>3+</sup>浓度下玉米功能叶片 PEP 羧化酶活性  
Table 4 Effect of different concentrations of La<sup>3+</sup> treatments on  
PEPCase activities in maize leaves

| La <sup>3+</sup> 浓度/mg·L <sup>-1</sup> | PEP 羧化酶活性/nmol·mL <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> (抑制率) |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 0(CK)                                  | 153.67±9.07a                                             |
| 60                                     | 113.33±14.05(26.3%)b                                     |
| 120                                    | 107.78±6.11(29.9%)c                                      |

3 讨论

本文研究 La<sup>3+</sup>溶液浸种处理玉米种子对其小喇叭口期植株叶片光合能力和 PEPCase 活性的影响,分析其气体交换参数在一天内的变化趋势,并采用直角双曲线修正模型对光强-光合速率响应曲线及 CO<sub>2</sub> 浓度-光合速率响应曲线进行拟合,提取其响应曲线的特征参数进行分析。结果表明,La<sup>3+</sup>溶液浸种能够缓解叶片的光合“午休”现象,显著提高玉米苗期叶片的表观量子效率,提高了叶片在弱光下的光合能力,而随着 La<sup>3+</sup>浓度的提高,玉米叶片的羧化效率显著降低,PEP 羧化酶活性受到显著抑制,同时也降低了叶片对高浓度 CO<sub>2</sub> 利用的能力。

前人研究结果表明,外源镧处理对光合作用光反应的影响主要表现为光合电子传递速率加快、循环和非循环光合磷酸化活力增强、放氧活性提高、PQ 穿梭加速等。本文以活体玉米植株叶片为试材获得的结果与前人研究结果具有较大的一致性,且这种影响主要表现为直接影响。但外源镧处理对光合作用暗反应的研究报道很少,其主要原因一是很难截然划分光反应

和暗反应的界限,二是目前研究暗反应在技术方面尚存在一定困难,其中同位素示踪是最常用的方法之一,但受到国家法令<sup>[24]</sup>和研究条件的严格限制。本文采用对 Ci-Pn 响应曲线特征参数进行统计分析,表明高浓度 La<sup>3+</sup>(120 mg·L<sup>-1</sup>)浸种处理的玉米叶片光合功能中可划归在暗反应范畴内的特征参数均表现为被明显地抑制(表 2),这能够在一定程度上启示研究者就外源镧等稀土元素对光合作用影响的机制应分别考虑其直接的调控作用和某种间接的调控作用。进一步研究结果显示,不同浓度 La<sup>3+</sup>浸种处理后,C4 植物碳同化关键酶磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEP-Case)活性显著降低(表 4)。

4 结论

综上所述,稀土镧主要能够协调玉米叶片光合作用的光反应,适宜浓度的镧溶液浸种能够发挥镧元素的正向作用,提高玉米对光的利用能力,虽然同步降低了叶片同化高浓度 CO<sub>2</sub> 的能力,但总体上来说,对玉米植株光合作用呈促进作用。

参考文献:

[1] 汪燕鸣. 稀土元素农业应用的研究进展[J]. 化工时刊, 2007, 21(2): 47-49.  
WANG Yan-ming. Research progress on application of rare earth in agriculture[J]. Chemical Industry Times, 2007, 21(2):47-49.  
[2] 张自立. 混合稀土对作物生长量的影响[J]. 中国稀土学报, 2001, 19(1): 85-87.  
ZHANG Zi-li. Effects of rare earth elements on growth of crops[J]. Journal of The Chinese Rare Earth Societ, 2001, 19(1):85-87.  
[3] 匡银近, 陈金安, 彭惠娥, 等. 稀土-壳寡糖配合物对大豆种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2009(16): 7410-7411.  
KUANG Yin-jin, CHEN Jin-an, PENG Hui-e, et al. Effect of the La<sup>3+</sup>-chitooligomers complex on the soybean seed sprouting and its seedling growth[J]. Journal of Anhui Agriculture Sciences, 2009(16):7410-7411.  
[4] 聂呈荣, 黎振兴. 稀土对花生光合作用和氮素代谢的影响[J]. 广东农业科学, 1996(5): 25-27.  
NIE Cheng-rong, LI Zhen-xing. Rare earth on peanut photosynthesis and nitrogen metabolism[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 1996(5): 25-27.

- [5] 何冬兰, 吴士筠, 高茜娣. 硝酸镧对冬小麦种子萌发活力的影响[J]. 中南民族学院学报, 1997, 16(3): 14-17.  
HE Dong-lan, WU Shi-jun, GAO Qian-di. Effects of  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  on the seed vigor of winter wheat[J]. *Journal of South-Central College for Nationalities (Nat Sci)*, 1997, 16(3): 14-17.
- [6] Fashui H, Li W, Xiang Yang M, et al. The effect of cerium(III) on the chlorophyll formation in spinach[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2002, 89(3): 263-276.
- [7] Gao Y, Zeng F, Yi A, et al. Research of the entry of rare earth elements  $\text{Eu}^{3+}$  and  $\text{La}^{3+}$  into plant cell[J]. *Biol Trace Elem Res*, 2003, 91(3): 253-265.
- [8] 谢祖彬, 朱建国. 分根法研究镧对水稻生长及其生理参数的影响[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(1): 71-75.  
XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo. Effect of lanthanum on rice growth and physiological parameters with split-root nutrient solution method[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(1): 71-75.
- [9] 邓兆活, 徐声杰, 邝炎华. 稀土处理对甘蔗离体叶绿体光化学反应的影响[J]. 华南农业大学学报, 1988(4): 49-54.  
DENG Zhao-huo, XU Shen-jie, KUANG Yan-hua. Effects of rare earths on photochemical reactions in sugar cane chloroplasts[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1988(4): 49-54.
- [10] 储钟稀. 氯化铈对高等植物叶绿素形成的影响[J]. 稀土金属, 1998, 11(7): 17-20.  
CHU Zhong-xi. Cerium chloride on chlorophyll formation in higher plants[J]. *Rare Earth Metals*, 1998, 11(7): 17-20.
- [11] 李赛君. 叶绿素镧的谱学研究[J]. 自然科学进展, 1997, 9(5): 577-583.  
LI Sai-jun. The spectroscopic study of  $\text{La}$  chlorophyll[J]. *Progress in Nature Science*, 1997, 9(5): 577-583.
- [12] CAO R, HUANG X H, ZHOU Q. Effects of lanthanum(III) on nitrogen metabolism of soybean seedling under elevated UV-B radiation[J]. *Environmental Science*, 2007, 19(11): 1361-1366.
- [13] 彭安, 朱建国. 稀土元素的环境化学及生态效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.  
PENG An, ZHU Jian-guo. Environmental chemistry of rare earth elements and ecological effects[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2003.
- [14] Li P M, Cai R G, Gao H Y, et al. Partitioning of excitation energy in two wheat cultivars with different grain protein contents grown under three nitrogen applications in the field[J]. *Physiologia Plantarum*, 2007, 129: 822-829.
- [15] Alonso A, Perez P, Morcuende R, et al. Future  $\text{CO}_2$  concentrations, though not warmer temperatures enhance wheat photosynthesis temperature responses[J]. *Physiologia Plantarum*, 2007, 132: 102-112.
- [16] 刘萍, 李明军. 植物生理学试验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
LIU Ping, LI Ming-jun. Plant physiology experimental technology[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] 叶子飘, 于强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型的比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2007(6): 771-775.  
YE Zi-piao, YU Qiang. Comparison of a new model of light response of photosynthesis with traditional models[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2007(6): 771-775.
- [18] 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型的比较[J]. 植物生态学报, 2008(6): 1356-1361.  
YE Zi-piao, YU Qiang. Comparison of new and several classical models of photosynthesis in response to irradiance[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008(6): 1356-1361.
- [19] 叶子飘, 于强. 冬小麦旗叶光合速率对光强度和  $\text{CO}_2$  浓度的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2008(3): 33-37.  
YE Zi-piao, YU Qiang. Photosynthetic response to irradiance and  $\text{CO}_2$  concentration for flag leaves of winter wheat[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2008(3): 33-37.
- [20] 叶子飘, 高峻. 低光强时丹参叶片的光合速率与光强的关系[J]. 井冈山学院学报, 2007(8): 47-50.  
YE Zi-piao, GAO Jun. Relationship photosynthetic rate of salvia miltiorrhiza with irradiance at low photon flux densities[J]. *Journal of Jinggangshan University*, 2007(8): 47-50.
- [21] 叶子飘. 光响应模型在超级杂交稻组合: II 优明 86 中的应用[J]. 生态学杂志, 2007(8): 1323-1326.  
YE Zi-piao. Application of light-response model in estimating the photosynthesis of super-hybrid rice combination: II You ming 86[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007(8): 1323-1326.
- [22] 王焘, 郑国生, 邹琦. 干旱与正常供水条件下小麦光合午休及其机理的研究[J]. 华北农学报, 1997, 12(4): 48-51.  
WANG Tao, ZHENG Guo-sheng, ZOU-Qi. A study on photosynthetic midday depression of wheat and mechanism under drought and well-watered conditions[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 1997, 12(4): 48-51.
- [23] 许大全, 丁勇. 田间小麦叶片光合效率日变化与光合“午睡”的关系[J]. 植物生理与分子生物学报, 1992, 18(3): 279-284.  
XU Da-quan, DING Yong. Relationship between diurnal variations of photosynthetic efficiency and midday depression of photosynthetic rate in wheat leaves under field conditions[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 1992, 18(3): 279-284.
- [24] 放射性同位素与射线装置安全许可管理办法: 中华人民共和国环境保护部令(第3号, 2008. 12. 6) 中国政府网, <http://www.gov.cn>.