

Ce(Ⅲ)对 UV-B 辐射胁迫下大豆幼苗光化学反应的影响

李津津¹, 李靖梅¹, 周青^{1,2*}

(1. 江南大学环境科学研究所, 无锡 214036; 2. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 无锡 214036)

摘要: 用水培法研究 Ce(Ⅲ)对 UV-B 辐射胁迫下大豆幼苗光化学反应的影响. 结果表明, 20 mg·L⁻¹ CeCl₃ 使大豆幼苗净光合速率(Pn)、Hill 反应、Mg²⁺-ATPase 活性与光合磷酸化活力 4 项指标较对照提高 23.2% ~ 14.3%; 有效抑制 UV-B 辐射(T₁ = 0.15 W·m⁻²和 T₂ = 0.45 W·m⁻²)胁迫下 4 项指标下降, 4 项指标降幅 [Ce(Ⅲ) + T₁ 为 36.6% ~ 15.9%, Ce(Ⅲ) + T₂ 为 65.6% ~ 33.2%] 小于对应的 UV-B 辐射组(T₁ 为 50.9% ~ 23.3%, T₂ 为 77.3% ~ 51.4%). 动态变化显示, Ce(Ⅲ)减缓了胁迫期 4 项指标的下降趋势, 促进了恢复期 4 项指标上升幅度. 说明 Ce(Ⅲ)通过减轻 UV-B 辐射对大豆幼苗光化学反应的伤害, 遏制 UV-B 辐射胁迫下大豆幼苗 Pn 下降.

关键词: 稀土铈; UV-B 辐射; 大豆幼苗; 净光合速率; 光化学反应

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1388-04

Effect of Ce(Ⅲ) on Photochemical Reaction Activity in Soybean Seedlings Under Supplementary UV-B Radiation Stress

LI Jin-jin¹, LI Jing-mei¹, ZHOU Qing^{1,2}

(1. Laboratory of Environmental Science, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

Abstract: Effect of Ce(Ⅲ) on photochemical reaction activity in soybean seedlings exposed to ultraviolet-B radiation (UV-B, 280 ~ 320 nm) was studied with hydroponics under laboratory conditions. The results showed that CeCl₃ (20 mg·L⁻¹) could improve photosynthesis action and net photosynthesis rate, the Mg²⁺-ATPase activeness, the photosynthetic phosphorylation active and stimulate the activity of Hill reaction (23.2% ~ 14.3%). And Ce(Ⅲ) could alleviate the inhibition of UV-B (T₁ = 0.15 W·m⁻² and T₂ = 0.45 W·m⁻²) on the four indexes above in plants to a certain extent, and the decreasing degrees of the indexes under Ce(Ⅲ) and UV-B stress were lower than those only under UV-B stress, which were 36.6% ~ 15.9% [Ce(Ⅲ) + T₁], 65.6% ~ 33.2% [Ce(Ⅲ) + T₂], 50.9% ~ 23.3% (T₁), 77.3% ~ 51.4% (T₂) respectively. The dynamic data indicated that Ce(Ⅲ) could alleviate the inhibition of UV-B on the four indexes above while promoting without UV-B stress. The results showed that Ce(Ⅲ) could alleviate the decrease in the net photosynthesis rate by lightening the damage of the photochemical reaction activity on the soybean seedlings under UV-B stress.

Key words: cerium; UV-B radiation; soybean seedling; net photosynthesis rate; photochemical reaction activity

最新研究显示,地球上空臭氧层衰减引发的 UV-B 辐射增强,给陆地初级生产力的提高带来阻抑效应.微观研究表明,初级生产力下降与 UV-B 辐射对植物光合作用的环境植物学效应密切相关^[1~4].显然,若能减轻 UV-B 辐射对植物光合作用的损伤,则有助于缓解 UV-B 辐射对陆地初级生产力的负面影响.前期研究证实^[5,6],微量稀土铈 Ce(Ⅲ)能够促进植物光合作用,缓解 UV-B 辐射胁迫对植物光合作用功能造成的伤害.然而,由于 UV-B 辐射降低植物光合作用的机制极为复杂,涉及诸如光合原初反应、电子传递与光合磷酸化及光合暗反应多个环节^[7~9],因而进一步澄清 Ce(Ⅲ)对 UV-B 辐射胁迫下,植物光合作用各环节的影响尤显必要.本研究以影响植物光合作用光化学反应的 3 个重要参数:希

尔反应活力、Mg²⁺-ATPase 活性与光合磷酸化活力为考察目标,分析三者在 UV-B 辐射胁迫下的变化,同时考察了 Ce(Ⅲ)对 UV-B 辐射胁迫下光化学反应的影响,借以判断 Ce(Ⅲ)调控植物光合作用、减轻 UV-B 辐射伤害的机理.

1 材料与方法

1.1 试材培养

大豆 (*Glycine max*) “垦农-18”种子用 0.1% HgCl₂ 消毒 5 min,去离子水冲净后放入有 3 层纱布

收稿日期: 2006-06-28; 修订日期: 2006-08-11

基金项目: 国家发展改革委员会稀土专项基金项目 (IFZ20051210); 国家自然科学基金项目 (30570323); 江苏省教育厅教改基金项目 (518)

作者简介: 李津津 (1984 ~), 女, 主要研究方向为环境生态学.

* 通讯联系人, E-mail: zhouqeco@yahoo.com.cn

的培养皿中,于恒温培养箱(25℃)中萌发.胚根达 3 cm 时移入塑杯($\phi=15\text{ cm}$, $V=400\text{ mL}$)中水培,每杯 3 株,室温 25~30℃.待真叶长出,改用 1/2 Hoagland 营养液培养,每天光照 12 h,光强 10.0 klx,早晚通气各 1 次,3 d 换 1 次营养液.第 2 枚三出复叶展开后,进行 Ce(Ⅲ)与 UV-B 辐射处理.

1.2 试材处理

以预实验筛选的最适浓度 CeCl_3 (20 mg/L)喷洒大豆叶片,滴液为限,对照(CK)喷等量去离子水.48 h 后进行 UV-B 辐射胁迫处理,UV-B 辐射剂量选用 2 个强度, T_1 (0.15 W/m²)、 T_2 (0.45 W/m²).将 UV-B 灯管(40 W,南京紫光电器厂)悬挂于植株上方,双通道 UV-B 辐照计(北京师范大学光电仪器厂)校

正.每天照射 6 h(09:00~15:00),连续照射 5 d.于 UV-B 辐照第 1 d 开始,每隔 24 h 取第 2 枚三出复叶测定下述指标,共测 6 次(全程 11 d),所有数据均 3 次重复,差异显著性分析采用 LSD 方法.

1.3 指标测定

净光合速率(P_n)用 CIRAS-1 便携式光合系统(PPS system International Ltd, UK)测定,设光强 400 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,闭合气路(CO_2 340 $\mu\text{L/L}$).希尔反应活力和 Mg^{2+} -ATPase 活性参照文献[10],光合磷酸化活力参照文献[11]的方法测定,Hill 指标中 μmol 代表 2,6-DCIP 的量, Mg^{2+} -ATPase 活性指标中 μmol 代表 P_i 量,光合磷酸化活力中 μmol 代表 ATP 的量,3 项指标单位中的 mg 代表叶绿素量(表 1).

表 1 Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下大豆幼苗净光合速率与光化学反应的影响¹⁾

Table 1 Effect of Ce(Ⅲ) on photosynthesis rate and photochemical reaction activity in soybean seedlings under UV-B radiation stress				
处理	$P_n/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	Hill 反应速率 $/\mu\text{mol}\cdot(\text{mg}\cdot\text{h})^{-1}$	Mg^{2+} -ATPase 活性 $/\mu\text{mol}\cdot(\text{mg}\cdot\text{h})^{-1}$	光合磷酸化活力 $/\mu\text{mol}\cdot(\text{mg}\cdot\text{h})^{-1}$
CK	5.4±0.3e(100.0)	49.4±0.2d(100.0)	176.0±2.7d(100.0)	16.3±0.1d(100.0)
Ce(Ⅲ)	6.3±0.1f(116.6)	56.5±1.3e(114.3)	207.1±2.2e(117.7)	20.1±0.8e(123.2)
T_1	2.7±0.1c(49.1)	27.1±1.1b(54.9)	135.0±0.1c(76.7)	12.0±0.9bc(73.3)
T_2	1.2±0.1a(22.7)	21.7±0.3a(43.9)	85.5±4.8a(48.6)	7.84±0.1a(48.1)
Ce(Ⅲ)+ T_1	3.9±0.2d(71.8)	31.3±0.7c(63.4)	147.4±9.1c(83.8)	13.7±0.8c(84.1)
Ce(Ⅲ)+ T_2	1.9±0.1b(34.4)	28.2±0.1b(57.1)	107.3±7.3b(61.0)	10.9±0.1b(66.8)

1)同一列中带相同字母表示处理间差异不显著($p<0.05$),括号中为相对值

2 结果与讨论

2.1 Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下大豆幼苗光化学反应活性影响

与 CK 相比,Ce(Ⅲ)组 P_n 、Hill 反应速率、 Mg^{2+} -ATPase 活性与光合磷酸化活力 4 项指标分别提高 16.6%、14.3%、17.7%与 23.2%;UV-B 辐射组 4 项指标则分别下降 50.9%、45.1%、23.3%、26.7%(T_1)和 77.3%、56.1%、51.4%、51.9% (T_2);对应的 Ce(Ⅲ)+UV-B 组 4 项指标分别下降 28.2%、36.6%、16.2%、15.9%[Ce(Ⅲ)+ T_1]和 65.6%、42.9%、39.0%、33.2%[Ce(Ⅲ)+ T_2].以上数据表明,Ce(Ⅲ)通过促进大豆叶片光化学反应提高光合作用速率,缓解 UV-B 辐射对其光化学反应的抑制,继而减轻其对光合作用功能伤害,且 Ce(Ⅲ)减轻低剂量 UV-B 辐射的伤害效果好于高剂量.

Ce(Ⅲ)促进光化学反应机理可能同其影响叶绿体 PSI 与 PS II 发育、增强 Hill 反应活力^[12]与 PS II 活性;提高光合电子传递速率,驱动整个光能转换和光化学反应相关^[13].

2.2 Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下 P_n 的动态影响

与 CK 相比[图 1(a)],Ce(Ⅲ)组 P_n 在整个实验时段皆高于 CK,至 11 d 仍高于 CK 10.1%;UV-B 组 P_n 在 1~5 d(胁迫期)呈下降趋势,6~11 d(恢复期)虽恢复抬升,但程度有限.至 11 d, T_1 和 T_2 的 P_n 仍低于 CK 21.6%和 44.5%. T_1 与 T_2 的胁迫期和恢复期变化显示,UV-B 辐射与 P_n 间存在明显的剂量效应关系;Ce(Ⅲ)+UV-B 组 P_n 变化规律与 UV-B 组相近,唯胁迫期降幅和恢复期升幅小或大于对应的 UV-B 组.至 11 d,Ce(Ⅲ)+ T_1 和 Ce(Ⅲ)+ T_2 的 P_n 低于 CK 9.2%和 21.0%.

上述变化说明,UV-B 辐射解除后,大豆幼苗 P_n 虽可自我恢复,但程度有限.比较而言, T_1 的自我恢复效果好于 T_2 .Ce(Ⅲ)的介入,改变了 UV-B 辐射胁迫下大豆幼苗 P_n 变化进程,即 Ce(Ⅲ)减缓了 UV-B 辐射胁迫期 P_n 下降,促进其恢复期回升,有减轻 UV-B 辐射抑制大豆光合作用的效应,且对 T_1 效果好于 T_2 .Ce(Ⅲ)减轻 UV-B 辐射伤害 P_n 的机理,与其对光化学反应影响有关(见以下 2.3~2.5).

2.3 Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下 Hill 反应速率的动态影响

与 CK 相比[图 1(b)],Ce(Ⅲ)组 Hill 反应速率变化规律与 Pn 近同,至 11 d 仍高于 CK 9.9%;UV-B 组 Hill 反应在胁迫期呈降势,但降幅小于 Pn. 恢复期抬升,至 11 d 时 T_1 和 T_2 的 Hill 反应速率尚低于 CK 8.1%和 19.8%($T_1 < T_2$). 同样,在整个实验期间,UV-B 辐射与大豆 Hill 反应速率间存在明显的剂量效应关系;Ce(Ⅲ)+UV-B 组 Hill 反应速率变化规律与 UV-B 组相近,仅胁迫期降幅和恢复期升幅小或大于对应的 UV-B 组.至 11 d,Ce(Ⅲ)+ T_1 和 Ce(Ⅲ)+ T_2 的 Hill 反应速率低于 CK 24.9%和 38.4%.

UV-B 辐射解除后,大豆幼苗 Hill 反应可在一定程度实现自我恢复,且 T_1 恢复效果明显好于 T_2 , T_2 轻度背离 CK,恢复受限.Ce(Ⅲ)促进 Hill 反应活力^[13],因此 Ce(Ⅲ)的介入,减缓了大豆幼苗 UV-B 辐射胁迫期 Hill 反应活力下降,促进其恢复期上升,且对 T_1 效果好于 T_2 . 说明 Ce(Ⅲ)减轻 UV-B 辐射伤害 Hill 反应活力是其缓解 Pn 下降原因之一.

2.4 Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下 Mg^{2+} -ATPase 活性的动态影响

与 CK 相比[图 1(c)],Ce(Ⅲ)组 Mg^{2+} -ATPase 活

性变化规律与前 2 个参数近同,至 11 d 仍高于 CK 11.1%;UV-B 组 Mg^{2+} -ATPase 活性在胁迫期下降,且降幅小于 Pn,恢复期 T_1 上升趋势小于 T_2 . 第 11 d, T_1 和 T_2 的 Mg^{2+} -ATPase 活性低于 CK 21.6%和 30.2% ($T_1 < T_2$). 说明 UV-B 辐射与大豆 Mg^{2+} -ATPase 活性间存在剂量效应关系;Ce(Ⅲ)+UV-B 组 Hill 反应速率变化规律与 UV-B 组相近,仅胁迫期降幅和恢复期升幅小或大于对应的 UV-B 组.至 11 d,Ce(Ⅲ)+ T_1 和 Ce(Ⅲ)+ T_2 的 Mg^{2+} -ATPase 活性低于 CK 9.5%和 22.2%.

大豆幼苗 Mg^{2+} -ATPase 活性在恢复期有限恢复,且 T_1 恢复不及 T_2 .Ce(Ⅲ)促进了 PSI 与 PS II 发育和 Hill 反应^[12],加快了电子传递速率,驱动 Mg^{2+} -ATPase 合成^[13]. 继而抑制 UV-B 辐射胁迫期 Mg^{2+} -ATPase 活性下降,促进其恢复期上升,且对 T_1 效果好于 T_2 . Ce(Ⅲ)减轻 UV-B 辐射伤害 Mg^{2+} -ATPase 功能是其缓解 Pn 下降的又一原因.

2.5 Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下光合磷酸化活力的动态影响

图 1(d)显示,Ce(Ⅲ)组光合磷酸化活力变化与

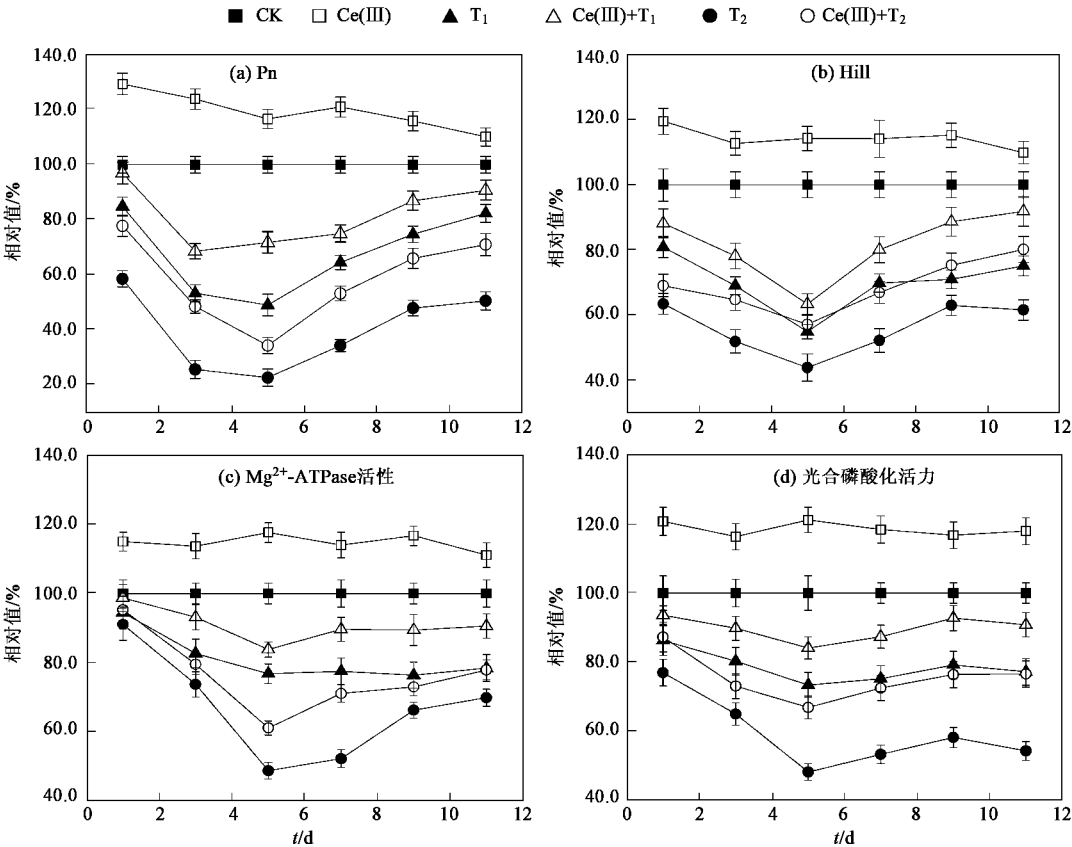


图 1 Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下大豆幼苗 Pn 与光化学反应的影响

Fig.1 Effect of Ce(Ⅲ) on photosynthesis rate and photochemical reaction activity in soybean seedlings under UV-B radiation stress

前述 3 个参数相近,至 11 d 仍高于 CK 18.0%;UV-B 组光合磷酸化活力在胁迫期下降,降幅小于 Pn,恢复期 T_1 优于 T_2 .第 11 d 的 T_1 和 T_2 低于 CK 22.8% 和 45.8%($T_1 < T_2$).UV-B 辐射与光合磷酸化活力间存在剂量效应关系;Ce(Ⅲ)+UV-B 组光合磷酸化活力变化规律与 UV-B 组相近,仅胁迫期降幅和恢复期升幅小或大于对应的 UV-B 组.至 11 d,Ce(Ⅲ)+ T_1 和 Ce(Ⅲ)+ T_2 的光合磷酸化活力低于 CK 9.2% 和 23.5%.

恢复期大豆光合磷酸化的恢复效果是 T_1 好于 T_2 , T_2 有远离 CK 倾向,揭示此后光合磷酸化功能恢复难以完成.Ce(Ⅲ)促进 Hill 反应活力并加快光合电子传递速率,有益于光合磷酸化功能提高^[13,14].换言之,Ce(Ⅲ)减轻 UV-B 辐射抑制光合磷酸化活力也是其缓解 Pn 下降的因素.

2.6 UV-B 辐射胁迫下 Ce(Ⅲ)与大豆 Pn 及光化学反应参数的关系

分析 Ce(Ⅲ)介入后 Pn 与光化学反应参数的关系(表 2),有助于认识光化学反应对 Pn 影响.不同处理显示,Pn 与 Hill 反应和 Mg^{2+} -ATPase 活性关联紧密,与光合磷酸化仅在高剂量[T_2 、Ce(Ⅲ)+ T_2]组显著;同一处理得知,低剂量[T_1 、Ce(Ⅲ)+ T_1]和 Ce(Ⅲ)+ T_2 组 Pn-Hill 反应相关系数 > Pn- Mg^{2+} -ATPase > Pn-光合磷酸化,高剂量(T_2)组 Pn-光合磷酸化相关系数 > Pn-Hill 反应 > Pn- Mg^{2+} -ATPase.上述相关分析说明:3 个光化学反应参数对 Pn 影响不一,Hill 反应和 Mg^{2+} -ATPase 活性是限制 Pn 的主要因素,且前者影响大于后者;随辐射剂量增加(T_2)限制因素发生转换,光合磷酸化成为 Pn 的重要限制因子^[15],同化力匮乏阻碍 Pn 提高;Ce(Ⅲ)组相关系数(r)小于对应 UV-B 组(低剂量组光合磷酸化除外),反映出 Ce(Ⅲ)可缓解 UV-B 辐射对大豆光化学反应的抑制.而 Ce(Ⅲ)介入后,大豆 Pn 与光化学反应的非同步改变则暗示,Ce(Ⅲ)改善大豆光合功能机制复杂,不局限于 3 个调节位点.

表 2 UV-B 辐射胁迫下 Ce(Ⅲ)与大豆 Pn 及光化学反应参数的相关关系¹⁾

处理	T_1	Ce(Ⅲ)+ T_1	T_2	Ce(Ⅲ)+ T_2
Pn-Hill 反应活力	0.955**	0.918**	0.851*	0.810*
Pn- Mg^{2+} -ATPase 活性	0.829*	0.768*	0.841*	0.735*
Pn-光合磷酸化活力	0.632	0.684	0.972**	0.728*

1) * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

3 结论

(1)20 mg/L Ce(Ⅲ)通过增大大豆幼苗 Hill 反应活力、 Mg^{2+} -ATPase 活性及光合磷酸化活力提高 Pn,在一定程度上减缓了 UV-B 辐射抑制光化学反应而导致的光合功能下降.

(2)Ce(Ⅲ)对 UV-B 辐射胁迫下大豆幼苗 Pn 与 3 个光化学反应参数的动态影响可知,Ce(Ⅲ)减缓了 3 项指标在胁迫期的下降,促进了恢复期的上升,最终呈现较好恢复效果,且对低剂量优于高剂量.

(3)Pn 与光化学活性相关性分析表明,除高剂量 UV-B 辐射(T_2)胁迫下,光合磷酸化活力是 Pn 的限制因素外,多数条件下 Hill 反应对 Pn 的影响最大, Mg^{2+} -ATPase 活性次之.Ce(Ⅲ)降低 Pn 与光化学反应参数间的相关系数,是其缓解 UV-B 辐射抑制光化学反应的结果.也暗示 Ce(Ⅲ)改善光合功能机制很复杂,有多个调节位点.

参考文献:

[1] Van T K, Garrard L A, West S H. Effects of UV-B radiation on net photosynthesis of some crop plants[J]. Crop Sci, 1976, 16: 715 ~ 718.

[2] Lingakumar K, Amudha P, Kulandavelu G. Exclusion of solar UV-B (280 ~ 315 nm) radiation on vegetative growth and photosynthetic active in *Vigna unguiculata* L.[J]. Plant Science, 2003, 148: 97 ~ 103.

[3] 郑有飞,简慰民,李秀芬,等.紫外辐射增强对大豆影响的进一步分析[J].环境科学学报,1998,18(5): 549 ~ 552.

[4] 侯扶江,贾桂英,颜景义,等.田间增加紫外线辐射对大豆幼苗生长和光合作用的影响[J].植物生态学报,1998,22(3): 256 ~ 261.

[5] 梁婵娟,黄晓华,周青.Ce 对 UV-B 胁迫下油菜光合与保护酶的影响[J].农业环境科学学报,2005,24(3): 620.

[6] 梁婵娟,黄晓华,陶文沂,等. Ce(Ⅲ)对 UV-B 胁迫下油菜幼苗生长及光合作用影响[J].中国稀土学报,2005,23(3): 351 ~ 356.

[7] Shama P K, Anand P, Sankhalkar S, et al. Photochemical and biochemical changes in wheat seedlings exposed to supplementary UV-B radiation [J]. Plant Science, 1998, 132: 21 ~ 30.

[8] Allen D J, Nogs S, Baker N R. Ozone depletion and increase UV-B radiation: is there a real threat to photosynthesis[J]. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(328): 1775 ~ 1788.

[9] Jansen M A K, Gaba V, Greenberg B M. Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation [J]. Trends in Plants Sciences, 1998, 3(4): 131 ~ 135.

[10] 汤章城.现代植物生理学试验指南[M].北京:科学出版社,2004.104 ~ 106.

[11] 袁晓华,杨中汉.植物生理生化试验[M].北京:高等教育出版社,1983.182 ~ 189.

[12] 中国稀土学会.中国稀土科技进展[M].北京:冶金工业出版社,2000.334 ~ 340.

[13] 沈博礼,戴新宾.稀土对小麦叶绿体光化学反应的效应[J].稀土,1994,15(2): 71 ~ 72.

[14] 陈为钧,魏正贵,陶冶,等.镧对烟草叶绿体光化学反应的影响[J].作物学报,2001,27(4): 506 ~ 511.

[15] 攀登奎,王雨国,张金桐. LaCl₃ 和 PrCl₃ 对菠菜离体叶绿体光合磷酸化作用的影响[J].中国稀土学报,2003,21(1): 77 ~ 80.