

稀土元素镧对黄花蒿光合作用及青蒿素积累的影响

周洁¹, 张霖², 郭兰萍^{1*}, 李耿³, 杨光¹, 赵曼茜¹, 黄璐琦¹

(1 中国中医科学院中药研究所, 北京 100700; 2 云南省农业科学院药用植物研究所, 云南 昆明 650223;

3 中日友好医院全国中西医结合心血管病中心, 北京 100029)

摘要:目的 探讨叶面喷施稀土元素镧对黄花蒿植株光合作用及青蒿素积累的影响。方法 采用 LF 6400 便携式光合作用测量系统测量黄花蒿 *Artemisia annua* 叶片净光合速率 (net photosynthetic rate, P_n), 采用脉冲调制叶绿素荧光仪测定 F_v/F_m 、 F_v/F_o 等荧光参数, 采用 UPLC 法测定青蒿素量, 使用 SPSS 13.0 分析软件进行统计。结果 不同浓度 LaCl_3 处理 22 d, 黄花蒿地上部分生长速率无显著性变化; 20~80 $\mu\text{mol/L}$ LaCl_3 处理促进青蒿素积累, 而 160 $\mu\text{mol/L}$ 处理抑制其积累; 20~80 $\mu\text{mol/L}$ LaCl_3 处理表现出促进 P_n 的优势, 而 160 $\mu\text{mol/L}$ 处理 P_n 低于对照; 20~80 $\mu\text{mol/L}$ 处理 2 d 后, F_v/F_m 、 F_v/F_o 显著提高, 160 $\mu\text{mol/L}$ 处理 2 d, F_v/F_m 显著提高, F_v/F_o 无显著性变化。结论 适宜浓度 (20~80 $\mu\text{mol/L}$) LaCl_3 可促进黄花蒿体内青蒿素积累及提高 P_n , P_n 提高可能与 PS II 原初光能转化效率及 PS II 潜在活性的提高有关。

关键词: 黄花蒿; 稀土元素镧; 光合作用; 青蒿素

中图分类号: R286.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-2670(2010)08-1371-04

Effects of lanthanum on leaf photosynthesis and artemisinin accumulation in *Artemisia annua*ZHOU Jie¹, ZHANG Lin², GUO Lan ping¹, LI Geng³, YANG Guang¹,
ZHAO Man qian¹, HUANG Lu qi¹

(1 Institute of Chinese Materia Medica, Academy of Traditional Chinese Medicine, Beijing 100700, China; 2. Medicinal Plants Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650223, China; 3. National Integrative Medicine Center for Cardiovascular Disease, China Japan Friendship Hospital, Beijing 100029, China)

Abstract: **Objective** To study the effects of lanthanum on leaf photosynthesis and artemisinin accumulation in *Artemisia annua*. **Methods** Net photosynthetic rate (P_n) in leaves of *A. annua* was determined by a portable gas exchange system (LI-6400). Chlorophyll fluorescence parameters F_v/F_m and F_v/F_o were recorded on a modulated chlorophyll fluorometer. The artemisinin content was measured by UPLC and data were analyzed by SPSS 13.0. **Results** The growth rate of aerial parts of *A. annua* did not change obviously under the treatment of LaCl_3 for 22 d. The artemisinin accumulation was elevated under the treatment of LaCl_3 at 20–80 $\mu\text{mol/L}$, while inhibited at 160 $\mu\text{mol/L}$. The P_n in leaves of *A. annua* under 20–80 $\mu\text{mol/L}$ LaCl_3 treatment showed the increased tendency, while the P_n at 160 $\mu\text{mol/L}$, was lower than that of control. Furthermore, the F_v/F_m and F_v/F_o under the treatment of LaCl_3 at 20–80 $\mu\text{mol/L}$ were both apparently improved. However, the F_v/F_m at 160 $\mu\text{mol/L}$ increased obviously, while the F_v/F_o showed no significant difference. **Conclusion** The artemisinin accumulation and P_n in *A. annua* are elevated under the treatment of LaCl_3 at the eligible concentration (20–80 $\mu\text{mol/L}$), and the improvement of P_n induced by LaCl_3 might be related with the elevation of the primary maximum photochemical efficiency and the potential activity of PS II.

Key words: *Artemisia annua* L.; rare earth element lanthanum; photosynthesis; artemisinin

青蒿 *Herba Artemisiae Annuae* 为常用中药, 为菊科植物黄花蒿 *Artemisia annua* L. 干燥地上部分, 具有抗疟、抗血吸虫病等功效, 以青蒿素为先导化合物研发的双氢青蒿素、青蒿琥酯等抗疟药已

成为当前抗药性疟疾治疗的首选药物, 且青蒿素、青蒿琥酯贴剂的研发为其提供了新的给药途径^[1-2]。目前青蒿素合成尚不能实现工业化生产, 从黄花蒿中提取是获取青蒿素的唯一途径^[3-4], 因此在栽培过

* 收稿日期: 2009-11-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2006CB504700); 国家自然科学基金资助项目 (30672616, 30672617); 国家科技支撑计划 (2006BA109B03)

作者简介: 周洁 (1981—), 女, 在读博士。Tel: (010) 64014411-2956 E-mail: zhoujie8761@163.com

* 通讯作者 郭兰萍 Tel: (010) 64011944 E-mail: glp01@126.com

程中采取有效措施来提高青蒿素量是满足市场需求的可行途径。稀土元素 (REEs) 作为植物生理活性物质, 具有增加生物量、改善品质和提高抗性等作用。我国是世界上稀土资源最丰富的国家, 为稀土农用提供了可靠基础。近年来人们将 REEs 用于中药材栽培, 无疑对提高药材产量和质量具有重要意义。已有报道, REEs 可以不同程度地促进人参、枸杞、薏苡、杜仲、灵芝、党参、金桔等药用植物^[5-6] 生长发育及次生代谢产物积累, 然而将 REEs 应用于黄花蒿的栽培过程中尚未见报道。本实验以黄花蒿为研究对象, 寻求叶面喷施 LaCl_3 的适宜浓度范围, 研究 LaCl_3 对黄花蒿生物量、青蒿素积累的影响并探讨其影响黄花蒿光合作用的机制, 为高产优质栽培黄花蒿提供理论依据。

1 材料

供试材料黄花蒿 *Artemisia annua* L. 采自广西。选取大小一致、健康的黄花蒿种了, 播种于洗净且灭菌的河砂中, $25\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (昼/夜) 发芽, 出苗后用 $1/2$ Hoagland 营养液浇灌培养。苗高 $4\sim 5\text{ cm}$ (苗龄约 40 d) 时, 选取长势良好一致的黄花蒿幼苗移栽入盛有砂土 (砂: 土 = $1:3$, 每盆砂土质量 500 g) 的方盆 (长 $\times$ 宽 $\times$ 高 = $8\text{ cm} \times 8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$) 内, 置于人工气候室内 (中国中医科学院中药研究所 AGC-11 人工气候室), 培养条件为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (昼/夜), 每天光照 14 h , 光强 $1\,000\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 相对湿度 $60\%\sim 65\%$ 。

2 方法

2.1 LaCl_3 处理方法: 黄花蒿苗龄 140 d 后, 选取长势一致的材料 200 盆, 随机分成 5 组, 每组 40 盆, 每盆 6 株, 于 2009 年 3 月 10 日分别用 0 、 20 、 40 、 80 、 $160\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$ 的 LaCl_3 溶液对黄花蒿叶片进行喷施, 对照喷等量蒸馏水, 喷施以叶片正反面均匀布满液滴且不下滴为限。样品经稀土处理 24 h 后连续 8 d 进行净光合速率 (P_n)、叶绿体荧光参数可变荧光 (F_v)、固定荧光 (F_o)、最大荧光 (F_m) 等各项指标检测, 喷施后连续采样测定青蒿素量。

2.2 黄花蒿地上部分生长速率测定: 黄花蒿地上部分生长速率采用处理后与处理前植株地上部分干物质质量之差与处理天数之比。

2.3 青蒿素提取及测定

2.3.1 提取: 样品采收后室温晾至质量不再减少为止, 粉碎至细粉 (过三号筛), 精密称定 0.5 g , 置具塞锥形瓶中, 精密加入石油醚 ($60\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$) 25 mL , 密塞, 称定质量, 超声 (100 W , 40 kHz) 提取 50

min , 放冷, 再称定质量, 用石油醚补质量, 摇匀, 滤过, 将续滤液蒸干, 残渣加甲醇使溶解, 转移至 5 mL 量瓶中, 加甲醇稀释至刻度, 摇匀、滤过, 备用。

2.3.2 测定: 测定青蒿素参照张东^[7] 等方法。色谱柱为 Nucleodur C_{18} ($250\text{ mm} \times 4.6\text{ mm}$, $5\text{ }\mu\text{m}$); 流动相为乙腈- 0.1% 乙酸 ($50:50$); 体积流量 $1.0\text{ mL}/\text{min}$; 柱温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 蒸发光散射检测器检测, 漂移管温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 载气 (N_2), 压力 207 kPa , 增益值为 50 ; 进样体积为 $10\text{ }\mu\text{L}$ 。

2.4 P_n 测定: 于 2009 年 3 月 11 日至 3 月 18 日 $9:30\sim 11:30$, 用 LF6400 便携式光合作用系统 (Licor, USA) 测定黄花蒿植株上数第 $6\sim 12$ 片功能叶片 P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。采用开放式气路, 样本室空气体积流量为 $500\text{ }\mu\text{mol}/\text{s}$, 温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 空气相对湿度 65% , 测定时光强为 $1\,000\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。 CO_2 浓度为 $(350 \pm 5)\text{ }\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。每个处理测量 6 株, 每株 1 个叶片。由于黄花蒿叶片呈裂片状, 只能选取叶片顶端光合仪叶室能够容纳的部分进行测定, 测完后采下测定部分, 采用肖强^[8] 等方法, 计算出每个测定叶面积, 把面积输入光合仪重新换算光合数据。

2.5 叶绿素荧光参数测定: F_v/F_m 、 F_v/F_o 等参数采用脉冲调制叶绿素荧光仪 OS5-FL (Opti Science, USA) 测定。用叶夹夹住测定 P_n 的连体叶片, 经暗适应处理 20 min 后首先用弱测量光测得初始荧光 (F_o), 再照射饱和脉冲光 [$6\,000\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 脉冲时间 0.7 s] 测得最大荧光 (F_m), $F_v = F_m - F_o$ 。

2.6 数据分析: 采用 SPSS 13.0 统计软件进行方差分析, 采用 Excel 软件绘图制表。

3 结果与分析

3.1 LaCl_3 对黄花蒿生长速率的影响: 不同浓度 (0 、 20 、 40 、 80 、 $160\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$) LaCl_3 处理 22 d , 黄花蒿地上部分生长速率分别为 4.53 、 3.4 、 4.4 、 5.4 、 $3.3\text{ mg}/(\text{株} \cdot \text{d})$, 各组间未表现出显著性差异 ($P > 0.05$)。

3.2 LaCl_3 对青蒿素积累的影响: 不同浓度 LaCl_3 对黄花蒿体内青蒿素积累的影响如表 1 所示。 $20\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$ 和 $80\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$ 处理表现出相似的变化规律, 即均于处理后 11 、 17 、 20 d 青蒿素量显著提高 ($P < 0.05$); $40\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$ 处理后 17 、 20 d 青蒿素量显著提高 ($P < 0.05$); $160\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$ 处理后 11 d 青蒿素量显著提高 ($P < 0.05$)。总的来看, $20\sim 80\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$ 处理 22 d 分别较对照提高了 31.20% ($20\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$)、 19.85% ($40\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$)、 8.20% ($80\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$)、 $160\text{ }\mu\text{mol}/\text{L}$ 较对照降低了 13.35% ($P < 0.05$)。

表 1 LaCl₃对青蒿素积累的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n = 6$)

Table 1 Effects of LaCl₃ on artemisinin accumulation ($\bar{x} \pm s$, $n = 6$)

LaCl ₃ 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同处理时间 青蒿素的量/%				
	8 d	11 d	17 d	20 d	23 d
CK	0.14±0.03 ^c	0.26±0.01 ^b _a	0.30±0.01 ^b _b	0.30±0.06 ^a _{ab}	0.30±0.08 ^b _b
20	0.24±0.02 ^d _a	0.28±0.02 ^c _a	0.35±0.04 ^b _a	0.39±0.08 ^a _a	0.39±0.05 ^a _a
40	0.26±0.01 ^e _a	0.27±0.04 ^c _a	0.30±0.01 ^b _b	0.35±0.01 ^a _{ab}	0.36±0.01 ^b _b
80	0.21±0.00 ^d _b	0.25±0.07 ^c _a	0.31±0.02 ^b _b	0.33±0.05 ^a _{ab}	0.33±0.06 ^b _b
160	0.17±0.01 ^b _c	0.22±0.05 ^a _a	0.23±0.04 ^c _a	0.26±0.07 ^b _b	0.26±0.04 ^a _c

上标不同字母表示横向差异显著,下标不同字母表示纵向差异显著 ($P < 0.05$),下同

Different letters in superscripts showed significant difference ($P < 0.05$) among transversal groups, while different letters in subscripts showed significant difference ($P < 0.05$) among lengthways groups. Same is used in following tables

3.3 LaCl₃对黄花蒿植株光合特性的影响

3.3.1 LaCl₃对黄花蒿植株净光合速率的影响:叶片净光合速率是体现植物有机物积累的重要指标之一。从表 2 可以看出,不同浓度 LaCl₃对黄花蒿植

表 2 LaCl₃对青蒿植株净光合速率的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n = 6$)

Table 2 Effects of LaCl₃ on net photosynthetic rate in leaves of *A. annua* ($\bar{x} \pm s$, $n = 6$)

LaCl ₃ 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同处理时间青蒿素 $P_n / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$							
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d
CK	6.37±1.19 ^a _a	7.78±0.86 ^b _b	8.80±1.10 ^a _c	8.81±1.47 ^a _a	7.94±0.67 ^b _b	8.49±1.72 ^a _a	6.69±0.77 ^b _b	8.49±3.21 ^a _a
20	7.44±1.60 ^a _a	7.21±0.89 ^b _{bc}	9.08±1.18 ^b _b	8.78±1.43 ^a _a	9.38±0.96 ^a _a	7.48±1.54 ^a _a	7.43±1.12 ^a _{ab}	8.40±1.64 ^d _a
40	7.45±1.35 ^a _a	8.86±0.90 ^b _{ab}	11.08±1.02 ^a _a	8.81±1.07 ^b _a	7.44±0.86 ^b _b	7.38±2.31 ^a _a	7.08±0.67 ^b _b	8.14±2.90 ^{bc} _a
80	6.49±0.73 ^c _a	9.40±1.69 ^a _a	7.47±1.44 ^d _c	8.46±1.17 ^b _a	7.78±0.85 ^b _b	8.12±1.63 ^{bc} _a	8.46±1.26 ^b _a	8.04±0.67 ^c _a
160	6.48±0.69 ^c _a	7.74±0.69 ^b _b	7.52±1.36 ^b _c	8.72±2.02 ^a _a	7.97±0.87 ^b _b	9.05±2.20 ^a _a	8.57±1.38 ^a _a	5.87±2.67 ^c _a

表 3 LaCl₃对青蒿植株叶绿素荧光参数 F_v/F_m 的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n = 6$)

Table 3 Effects of LaCl₃ on chlorophyll fluorescence parameters F_v/F_m in leaves of *A. annua* ($\bar{x} \pm s$, $n = 6$)

LaCl ₃ 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同处理时间青蒿素 F_v/F_m							
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d
CK	0.67±0.05 ^c _c	0.72±0.05 ^b _a	0.71±0.05 ^b _a	0.70±0.07 ^c _a	0.7847±0.03 ^a _a	0.74±0.04 ^a _a	0.76±0.04 ^a _a	0.74±0.06 ^a _a
20	0.75±0.04 ^a _a	0.74±0.04 ^a _a	0.74±0.04 ^a _a	0.70±0.05 ^a _a	0.7405±0.05 ^a _b	0.68±0.01 ^a _b	0.78±0.04 ^a _a	0.74±0.04 ^a _a
40	0.69±0.04 ^b _{bc}	0.74±0.04 ^a _a	0.71±0.06 ^b _a	0.72±0.04 ^a _a	0.7470±0.04 ^a _{ab}	0.76±0.03 ^a _a	0.76±0.05 ^a _a	0.74±0.04 ^a _a
80	0.77±0.03 ^a _a	0.77±0.06 ^a _a	0.77±0.05 ^a _a	0.71±0.06 ^b _a	0.7343±0.04 ^b _b	0.73±0.04 ^b _{ab}	0.77±0.05 ^a _a	0.76±0.03 ^a _a
160	0.72±0.03 ^b _b	0.73±0.05 ^b _a	0.75±0.05 ^a _a	0.73±0.06 ^b _a	0.7192±0.02 ^b _b	0.78±0.08 ^a _a	0.76±0.04 ^a _a	0.74±0.03 ^b _a

由表 3 可见,各处理组处理后 2 d, F_v/F_m 明显提高,各处理组 (由低浓度到高浓度) 分别较对照提高 13.14% ($P < 0.05$)、3.03% ($P > 0.05$)、15.58% ($P < 0.05$)、8.63% ($P < 0.05$); 20 $\mu\text{mol/L}$ LaCl₃处理后 F_v/F_m 保持稳定,8 d 内无显著性变化 ($P < 0.05$),40、80、160 $\mu\text{mol/L}$ LaCl₃均与处理后 3、4 d 出现波动性变化,处理后 8 d 趋于稳定。

由表 4 可见,LaCl₃处理后 2 d, F_v/F_o 与 F_v/F_m 表现出相似的变化趋势,各处理组 (由低浓度到高浓度) 分别较对照提高 47.64% ($P < 0.05$)、5.19% ($P > 0.05$)、62.26% ($P < 0.05$)、25.94

株净光合速率的影响表现出一定规律,即无论高浓度还是低浓度稀土溶液处理均表现出先促进植株净光合速率,而处理后 8 d 净光合速率趋于稳定,各处理间无显著性差异 ($P > 0.05$); 各处理组净光合速率分别于喷施后 2 d (80 $\mu\text{mol/L}$)、3 d (40 $\mu\text{mol/L}$)、5 d (20 $\mu\text{mol/L}$) 达到峰值,显著高出对照 20.82%、25.90%、18.14% ($P < 0.05$); 160 $\mu\text{mol/L}$ 处理后 6 d 净光合速率达到峰值,高出对照 6.60%,但未产生显著性差异 ($P > 0.05$); 从喷施后 8 d 内植株净光合速率均值来看,由大到小顺序为 40 $\mu\text{mol/L}$ > 20 $\mu\text{mol/L}$ > 80 $\mu\text{mol/L}$ > CK > 160 $\mu\text{mol/L}$ 。

3.3.2 LaCl₃对黄花蒿叶绿素荧光参数的影响:在叶绿素荧光诱导动力学参数的测定中, F_v/F_m 可代表光反应中心光系统 II (PS II) 原初光能转换效率, F_v/F_o 则反映了 PS II 的潜在活性,它们都是反映光化学反应状况的两个重要参数^[9]。

($P > 0.05$); 40 和 80 $\mu\text{mol/L}$ 处理后 5 d 趋于稳定, 20 和 160 $\mu\text{mol/L}$ 处理后 7 d 趋于稳定。

4 讨论与结论

4.1 黄花蒿叶面喷施 LaCl₃适宜浓度范围:植物对 REEs 吸收有一个临界量,当稀土施用量达到一定浓度时才表现出促进作用,达不到这一浓度对植物生长没有明显的影响,当浓度超过临界量,植物生长将受到抑制甚至毒害^[10]。

本实验以黄花蒿幼苗为研究对象,考察了叶面喷施 LaCl₃对黄花蒿植株地上部分生长速率及青蒿素积累的影响。从生长速率来看,80 $\mu\text{mol/L}$ LaCl₃处理对提高植株地上部分生长速率有轻微促进作

表 4 LaCl_3 对青蒿植株叶绿素荧光参数 F_v/F_o 的影响 ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)Table 4 Effects of LaCl_3 on chlorophyll fluorescence parameters F_v/F_o in leaves of *A. annua* ($\bar{x} \pm s$, $n=6$)

LaCl_3 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同处理时间青蒿素 F_v/F_o							
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d
CK	2 12 $\pm$ 0.41 _c	3 23 $\pm$ 1.65 _a	2 66 $\pm$ 0.64 _b	2 59 $\pm$ 0.95 _b	3 74 $\pm$ 0.69 _a	2 96 $\pm$ 0.66 _b	3 32 $\pm$ 1.03 _a	3 26 $\pm$ 1.22 _a
20	3 13 $\pm$ 0.55 _b	2 95 $\pm$ 0.68 _b	2 37 $\pm$ 0.49 _c	2 40 $\pm$ 0.41 _c	2 96 $\pm$ 0.68 _b	2 16 $\pm$ 0.14 _d	3 75 $\pm$ 1.40 _a	3 77 $\pm$ 1.33 _a
40	2 23 $\pm$ 0.38 _c	3 00 $\pm$ 0.69 _a	2 70 $\pm$ 0.56 _b	2 68 $\pm$ 0.64 _b	3 03 $\pm$ 0.60 _b	3 15 $\pm$ 0.51 _a	2 78 $\pm$ 1.20 _b	2 11 $\pm$ 1.09 _a
80	3 44 $\pm$ 0.52 _a	4 54 $\pm$ 3.14 _a	2 63 $\pm$ 0.69 _b	2 71 $\pm$ 0.56 _b	2 96 $\pm$ 0.52 _b	2 85 $\pm$ 0.52 _b	3 49 $\pm$ 0.93 _a	3 41 $\pm$ 0.76 _a
160	2 67 $\pm$ 0.47 _b	3 04 $\pm$ 1.00 _a	2 81 $\pm$ 0.59 _a	2 80 $\pm$ 1.04 _a	2 58 $\pm$ 0.21 _b	2 97 $\pm$ 0.46 _a	3 31 $\pm$ 0.90 _a	3 32 $\pm$ 0.79 _a

用, 160 $\mu\text{mol/L}$ LaCl_3 处理略低于对照, 但均未产生显著性差异, 分析原因可能与稀土处理时间较短 (22 d) 及检测指标为地上干质量有关, 稀土对生长速率的影响尚未表现出显著性差异。从青蒿素积累来看, 低浓度 (20 $\mu\text{mol/L}$) LaCl_3 可大幅度提高青蒿素量, 其次是中浓度 (40 和 80 $\mu\text{mol/L}$), 而高浓度 (160 $\mu\text{mol/L}$) 稀土处理青蒿素量低于对照, 表明超过一定浓度的 REEs 处理会抑制青蒿素积累。综合考虑, 建议叶面喷施稀土 LaCl_3 适宜浓度范围为 20~ 80 $\mu\text{mol/L}$, 可根据黄花蒿苗龄大小适当增减其浓度。

4.2 稀土元素促进黄花蒿光合作用及青蒿素积累的机制探讨: 近年来, REEs 影响植物光合作用机制研究逐步深入。有学者报道^[11-12], La、Ce、Nd 可以进入叶绿素卟啉环形成双层结构的稀土叶绿素, 明显提高 PS II 的活性和电子传递效率, 并使两个光系统 (PS I 和 PS II) 的荧光发射峰蓝移; 稀土处理还可诱导菠菜体内形成核酮糖-1, 5-二磷酸羧化酶/加氧酶 (Rubisco) 和 Rubisco 活化酶的复合体, 提高 CO_2 的同化效率, 促进植物光合碳同化, 从而提高光合效率^[13] 等。

在叶绿素荧光参数中, F_v/F_m 反映了开放的 PS II 反应中心捕获激发能的效率, 任何影响 PS II 效能的环境变换都影响着 F_v/F_m 改变。有研究认为 F_v/F_m 与光合作用的净产率呈正相关^[14], 光化学效率的高低直接决定叶片光合作用的高低。本实验考察了 LaCl_3 处理后 P_n 及 F_v/F_m 、 F_v/F_o 等叶绿素荧光参数的动态变化, 结果表明 20~ 80 $\mu\text{mol/L}$ LaCl_3 均表现出促进黄花蒿 P_n 的优势, F_v/F_m 、 F_v/F_o 分别于喷施后 2 d 出现显著提高, 因此推测 LaCl_3 处理导致黄花蒿 P_n 提高可能与 PS II 原初光能转化效率及 PS II 活性的提高有关。

青蒿素合成起源于甲羟戊酸, 甲羟戊酸又源于和光合作用相关的乙酰辅酶 A, 加强光合作用有利于青蒿素合成和积累^[15], 因此推测 LaCl_3 处理导致青蒿素量提高可能促进光合作用有关。

4.3 REEs 在中药材栽培中应用前景广阔: REEs 虽然不属于植物生长所必需的营养元素, 但适当浓度的 REEs 可以促进种子萌发, 改善植物对氮、磷、钾等养分的吸收, 提高光合强度及促进次生代谢产物的积累, 是一种值得推广的植物生长调节剂。

总之, 适当浓度的 REEs 可以使中药材增产、改善品质并最终提高药效, 以及我国丰富的稀土资源使得 REEs 在中药材栽培种的应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 王乃婕, 邱琳, 杜丰, 等. 青蒿素贴剂的制备研究 [J]. 现代药物与临床, 2009, 24(3): 163-166
- [2] 邱琳, 王乃婕, 杜丰, 等. 青蒿琥酯贴剂压敏胶处方的研究 [J]. 现代药物与临床, 2009, 24(4): 233-237
- [3] 范振涛, 马小军, 张明庆. 青蒿素产量影响因素的研究进展 [J]. 中草药, 2008, 39(2): 313-316
- [4] Liu C X, Xiao P G, Peng Y, et al. Challenges in research and development of traditional Chinese medicines [J]. Chin Herb Med, 2009, 1(1): 1-28
- [5] 陈浩. 稀土元素在中草药中的应用及其前景 [J]. 分析科学学报, 2002, 18(4): 333-337
- [6] 吴其飞, 黄达明, 董英. 茎部注射稀土元素对金柑生长及果实品质的影响 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(10): 1254-1259
- [7] 张东, 杨岚, 杨立新, 等. HPLC-UV-ELSD 法同时测定青蒿素中青蒿素、青蒿乙素和青蒿酸的含量 [J]. 药科学, 2007, 42(9): 978-981
- [8] 肖强, 叶文景, 朱珠, 等. 利用数码相机和 Photoshop 软件非破坏性测定叶面积的简便方法 [J]. 生态学报, 2005, 24(6): 711-714
- [9] 韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等. 紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 对于干旱胁迫的光合生理响应 [J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5229-5237
- [10] 何跃军, 薛立. 稀土元素对植物的生物效应及其作用机理 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1983-1989
- [11] Hong F S, Wei Z G, Zhao G W, et al. Extended X-ray absorption fine structure study of the bound form of lanthanide in chlorophyll a from *Dieranopteris dichotoma* [J]. Biol Trace Elem Res, 2001, 82: 289-295
- [12] Lju C, Hong F S, W L, et al. Effect of Nd^{3+} on photosynthesis of spinach [J]. J Rare Earths, 2004, 22(2): 306-310
- [13] Hong F S, Liu C, Zheng L, et al. Formation of complexes of Rubisco-Rubisco activase from La^{3+} , Ce^{3+} treatment spinach [J]. Sci China (Ser B), 2005, 48(1): 67-74
- [14] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The Basics. Annu Rev [J]. Plant Physiol Plant Mol Biol, 1991, 42: 313-349
- [15] Liu C C, Wang Y C, Ouyang P. Advances in artemisinin research [J]. Prog Chem, 1999, 11(1): 41-48