

## 酸雨与镧对大豆幼苗生长的复合伤害效应研究

梁婵娟<sup>1,2</sup>, 潘丹云<sup>2</sup>, 徐秋荣<sup>2</sup>, 周青<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学工业生物技术教育部重点实验室, 无锡 214122; 2. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122)

**摘要:**为探索酸雨与稀土镧对大豆幼苗生长的复合影响及其内在机制,以重要油粮作物大豆(*Glycine max*)为材料,研究在模拟酸雨 pH 分别为 3.0、3.5、4.5 与稀土镧 La(Ⅲ)浓度分别为 60、100 和 300 mg·L<sup>-1</sup>处理下大豆幼苗生长及光合作用的变化。结果表明,相对单一酸雨与镧处理,酸雨与 La(Ⅲ)复合处理组中大豆幼苗的生长受抑制程度增大,两者呈协同效应,且 pH 越低,La(Ⅲ)浓度越高,抑制效应越明显。光合参数的变化规律与生长指标近同,相同处理组各光合参数的降幅不一致,其中最大荧光( $F_v/F_m$ )和叶绿素含量(Chl)的降幅范围分别为 9.53%~22.75% 和 9.14%~24.53%,较净光合速率  $P_n$  (22.78%~84.7%)、希尔(Hill)反应速率(15.52%~73.38%)和  $Mg^{2+}$ -ATPase 活性(14.51%~71.54%)小,表明各光合参数对 2 个胁迫因子的敏感程度存在差异。进一步相关性分析发现, $P_n$  变化主要受 Hill 反应速率与  $Mg^{2+}$ -ATPase 活性的影响,而 Chl、 $F_v/F_m$  次之。表明酸雨与 La(Ⅲ)对植物光合过程各环节的作用机制不同,光合作用受阻是影响植物生长的重要因素之一。

**关键词:**镧;酸雨;复合伤害;大豆幼苗;生长指标;光合指标

中图分类号:X171; X517 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)07-1652-05

## Combined Injured Effects of Acid Rain and Lanthanum on Growth of Soybean Seedling

LIANG Chan-juan<sup>1,2</sup>, PAN Dan-yun<sup>2</sup>, XU Qiu-rong<sup>2</sup>, ZHOU Qing<sup>1,2</sup>

(1. The Key Laboratory of Industrial Biotechnology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Combined effects of acid rain and lanthanum on growth of soybean seedling (*Glycine max*) and its inherent mechanism were studied in this paper. Compared with treatments by simulated acid rain (pH 3.0, 3.5, 4.5) or rare earth La(Ⅲ) (60, 100 and 300 mg·L<sup>-1</sup>), the decrease degree of growth parameters in combined treatments was higher, indicating that there were a synergistic effects between acid rain and La. Moreover, the inhibition effects of acid rain and La(Ⅲ) were more obvious when pH value of acid rain was lower or the concentration of La(Ⅲ) was higher. The changes of photosynthetic parameters were similar to those of growth, but the decrease degree of each parameter was not same in the same treatment group. The decrease degree of optimal PSII photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ) and chlorophyll content (Chl) were 9.35%-22.75% and 9.14%-24.53%, respectively, lower than that of photosynthetic rate  $P_n$  (22.78%-84.7%), Hill reaction rate (15.52%-73.38%) and  $Mg^{2+}$ -ATPase activity (14.51%-71.54%), showing that the sensitivity of photosynthetic parameters to the combined factors was different. Furthermore, relative analysis showed that the change of  $P_n$  were mainly affected by Hill reaction rate and  $Mg^{2+}$ -ATPase activity, and was less influenced by Chl and  $F_v/F_m$ . It indicates that the effect of acid rain and La on each reaction in photosynthesis was different, and the inhibition of combined treatments on photosynthesis in plants was one of the main factors affecting growth of plant.

**Key words:** lanthanum; acid rain; compound injury effect; soybean seedlings; growth indicator; photosynthetic indicators

酸雨(acid rain, AR)作为全球主要环境公害之一,引起世人关注。我国已成为继北欧和北美之后世界第三大酸雨区(中国酸沉降面积达国土面积的40%以上)<sup>[1]</sup>。日益严重的酸雨,制约着我国的农业生产<sup>[2]</sup>。大量研究表明,酸雨造成植物急性伤害的同时,也因降落后引起土壤理化性质改变而间接影响植物的正常代谢<sup>[2]</sup>。稀土(rare earth, RE)农用在我国历时30余年,取得显著成果。但长时间和大面积施用稀土会造成稀土元素在土壤表层持留与积累,形成潜在的环境安全隐患。目前,我国土壤中稀土赋存量约为108~480 mg/kg,其中镧(La)的比例最高<sup>[3]</sup>。事实上,进入土壤的外源稀土很快被土壤

胶体吸附固定成为束缚态稀土,在自然条件下很难发生迁移,然而在酸雨多发农业区,土壤pH值随酸性降水而降低,土壤中的稀土离子淋溶加强,赋存状态改变,解析量升高,生物可利用性增加<sup>[4]</sup>。有研究表明:高浓度的稀土会抑制植物的生长,更高浓度时则使植物死亡<sup>[5]</sup>。那么由酸雨沉降导致土壤中生物可溶性稀土浓度增加,是否会加重酸雨对植物的危

收稿日期:2009-09-11;修订日期:2009-12-15

基金项目:江苏省教育厅高等学校教学改革项目(3-26-77);江南大学青年基金项目(2008LQN005);江南大学院长基金项目(HT2008-6-1)

作者简介:梁婵娟(1978~),女,副教授,主要研究方向为环境生态学, E-mail: liangchanjuan@jiangnan.edu.cn

害? 酸雨和稀土对植物生命活动产生有怎样的复合效应? 植物生长发育的物质基础源自光合器官将太阳光能转变为化学能的光合作用, 光合效率的高低是影响幼苗生长的主要原因之一。而光反应是光合作用的起点, 该过程受损与否决定光合作用及整个光系统在以后各阶段活性。因此, 本研究以粮油作物大豆为试材, 以生长指标和光合光反应参数为考察目标, 探讨酸雨与镧对大豆幼苗生长的影响和内在机制, 以期为客观评价酸雨危害及稀土农用的环境风险提供基础实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试材培养

挑选籽粒饱满、完整无损、大小均匀的大豆 (*Glycine max*) “垦农 18” 种子用 0.1%  $\text{HgCl}_2$  消毒 5 min, 去离子水冲洗后, 并用滤纸吸干表面水分, 置 3 层纱布培养皿中, 于恒温培养箱  $25^\circ\text{C} \pm 1.0^\circ\text{C}$  中萌发。胚根长至 2 cm 移入塑杯 ( $\phi = 15\text{ cm}$ ) 中培养, 每杯 3 株, 日换水 1 次。第二枚真叶出现, 改用 1/2 Hoagland 营养液、室温  $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  培养, 日照光 12 h (光强 8 000 lx), 早晚通气各 1 次, 并用去离子水维持溶液体积, 3 d 换 1 次营养液, 至第 3 片真叶展开后处理。

### 1.2 酸雨与稀土处理

配置  $\text{LaCl}_3$  溶液 (60、100、300  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) [6]。模拟酸雨 (AR) [6], 先配置 pH 1.0 的 AR 母液, 其中硫酸根与硝酸根的体积比为 4.7:1 (此比例是严格按照江苏地区自然降雨的化学组分配置)。以去离子水作为稀释液, 将 pH 稀释为 3.0、3.5、4.5, 用 PHS-29A 酸度计 (上海精密科学仪器有限公司) 校准。

用配制好的  $\text{La}(\text{III})$  溶液浸泡大豆幼苗根部, 每天处理 6 h, 持续处理 7 d, 对照植株 (CK) 用等量营养液浸泡。分别在第 3、6 d, 用喷雾 × 叶片喷施不同 pH 值 AR 溶液, 以滴液为限, CK 喷等量蒸馏水。试验设置为: CK、 $\text{RE}_1$  (60  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{RE}_2$  (100  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{RE}_3$  (300  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{AR}_1$  (pH 3.0)、 $\text{AR}_2$  (pH 3.5)、 $\text{AR}_3$  (pH 4.5)、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_2$ 、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_3$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_2$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_3$ 、 $\text{RE}_3 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_3 + \text{AR}_2$ 、 $\text{RE}_3 + \text{AR}_3$ , 以上各处理均 3 杯, 每杯 3 株, 每个处理样有 9 株。

### 1.3 指标测定

生长指标测定方法如下: 株高用直尺测量, 叶面积以透明方格纸法计算而得 [7], 以单株为单位, 分别测出每株大豆幼苗的叶、茎、根鲜重。然后置于电

热恒温干燥箱中  $100^\circ\text{C}$  杀青 10 min,  $80^\circ\text{C}$  烘 12 h 至恒重, 分别称其干重 [8]。生理指标测定中, 每株苗均取第 3 片真叶为测定叶。净光合速率 ( $P_n$ ) 用 Li-6400 光合作用测定仪 (Li-COR, USA) 测定 [9], 环境温度为  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , 湿度  $60\% \pm 5\%$ ; 叶绿素 (Chl) 含量参照文献 [10]; 希尔反应速率 (制备叶绿体悬浮液, 以二氯靛酚为显色剂, 在 620 nm 下测  $D$  值的变化) 和  $\text{Mg}^{2+}$ -ATPase 活性 (制备叶绿体悬浮液, 以甲醇作为激活剂,  $37^\circ\text{C}$  水浴 2 min 后加入三氯乙酸终止反应, 加入硫酸亚铁-钼酸铵试剂显色, 在 660 nm 测得  $D$  值, 查标准曲线计算出无机磷的含量, 按公式计算酶活性) 参照文献 [11], 无细节改动; 采用 FMS2 型便携式调制荧光分析仪 (Hansatech 公司), 参照文献 [12], 暗适应 15 min 后测得相关叶绿素荧光参数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AR 与 $\text{La}(\text{III})$ 对大豆幼苗生长的复合影响

经 AR、 $\text{La}(\text{III})$  及  $\text{AR} + \text{La}(\text{III})$  处理后, 大豆生长均受到不同程度的影响。表 1 数据显示, 与 CK 相比, 单一 AR 处理下, 大豆的生长均受到抑制, 且随 pH 值的降低, 伤害程度加重, 降幅为  $\text{AR}_1 > \text{AR}_2 > \text{AR}_3$ ; 单一  $\text{La}(\text{III})$  处理下, 大豆的生长均受到抑制, 且随浓度的增加, 伤害程度加重, 降幅为  $\text{RE}_3 > \text{RE}_2 > \text{RE}_1$ ; 复合处理下, 大豆受到的伤害程度均比单一 AR 和 RE 处理严重, 其中, pH 越低,  $\text{La}(\text{III})$  浓度越高, 其复合伤害越重。进一步比较分析发现, 相同处理下各指标降幅互不相同, 茎干重受抑制程度较轻, 降幅范围为 0.800% ~ 58.3%, 而叶干重降幅范围 (1.80% ~ 91.8%) 较大。此外各处理样组的根冠比较对照组均有所下降, 但不大, 这可能是植物增大地上器官增加光合作用来缓解复合伤害。有研究表明: 镧在同一种植物根、茎、叶中存在的含量不同 [13~15], 且轻稀土  $\text{La}(\text{III})$  易被植物吸收, 在植物中不易迁移 [14], 各器官含量表现为根 > 叶 > 茎, 而本研究的各器官生物量降幅为根 > 叶 > 茎, 说明镧的量越多, 器官受伤害越严重, 当然也可能与各器官功能有密切关系。根作为吸收器官, 与稀土密切接触, 是稀土离子接触的最初部位, 加上它分泌一些有机酸、氨基酸等促进对稀土元素的吸收 [16], 显现的伤害效应最明显。然而根系生物量的剧减也可视为植物为减小毒害而降低自身的质量; 叶作为地上主要器官, 酸雨胁迫诱导产生的大量自由基 [17], 导致细胞质膜损伤, 最终引起代谢紊乱, 影响幼苗生长发育。另外, 部分稀土在同一植物不同器官中存在的价态形式不

同<sup>[18,19]</sup>,这可能也是导致各器官所受伤害程度不同的原因之一。

## 2.2 AR 与 La(Ⅲ) 对大豆幼苗光合作用的复合影响

AR、La(Ⅲ) 及 AR + La(Ⅲ) 不同处理对大豆幼苗各光合参数影响规律不尽一致(见图 1)。与 CK 相比,单一 AR 处理下,Chl、 $F_v/F_m$ 、Hill 反应速率、 $Mg^{2+}$ -ATPase 活性和  $P_n$  均随 pH 值减小而降低,呈明显的剂量-效应关系,降幅为  $AR_1 > AR_2 > AR_3$ 。酸雨致使幼苗对镁、铁、铜、锌等叶绿素合成所必须的

金属离子吸收困难<sup>[20]</sup>,影响叶绿素合成,减少叶绿素含量和光合叶面积<sup>[21]</sup>,同时也造成 PS II 损伤,导致 ATP 减少,无法满足碳同化的需要,使叶片暗反应受阻,光合速率降低<sup>[20]</sup>。单一 La(Ⅲ) 处理下,5 项光合参数均随 La(Ⅲ) 浓度的增大而降低,也呈现明显的剂量-效应关系,降幅为  $RE_3 > RE_2 > RE_1$ 。复合处理下,各指标的降幅都明显大于相应的单一处理组,表明这 2 种胁迫方式呈协同效应。随 AR 的 pH 值降低,RE 浓度增加,复合处理组的降幅增大。

表 1 酸雨与镧对大豆幼苗生长的复合影响( $n=3$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Combined effects of acid rain and La(Ⅲ) on the growth of soybean seedling( $n=3$ )

| 处理                                               | 株高/cm                  | 叶面积/cm <sup>2</sup>    | 根干重/g                        | 茎干重/g                       | 叶干重/g                       | 根冠比                       |
|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| CK<br>(0 mg·L <sup>-1</sup> )                    | 62.5 ± 0.251<br>(100)  | 90.6 ± 0.237<br>(100)  | 0.105 ± 0.0107<br>(100)      | 0.125 ± 0.017 8<br>(100)    | 0.054 6 ± 0.068 7<br>(100)  | 0.590 ± 0.023 8<br>(100)  |
| AR <sub>1</sub><br>(pH 3.0)                      | 60.2 ± 0.162<br>(96.4) | 60.1 ± 1.98<br>(96.2)  | 0.092 2 ± 0.045 6<br>(87.8)  | 0.121 ± 0.056 2<br>(97.2)   | 0.051 1 ± 0.000 0<br>(93.6) | 0.538 ± 0.011 8<br>(91.2) |
| AR <sub>2</sub><br>(pH 3.5)                      | 61.9 ± 0.165<br>(99.0) | 58.8 ± 7.10<br>(64.9)  | 0.094 0 ± 0.054 8<br>(89.5)  | 0.122 ± 0.033 2<br>(97.8)   | 0.051 6 ± 0.000 0<br>(94.6) | 0.544 ± 0.047 3<br>(92.2) |
| AR <sub>3</sub><br>(pH 4.5)                      | 58.5 ± 2.15<br>(93.7)  | 78.4 ± 1.30<br>(86.6)  | 0.098 0 ± 0.046 8<br>(93.4)  | 0.124 ± 0.089 0<br>(99.2)   | 0.053 6 ± 0.000 0<br>(98.2) | 0.556 ± 0.032 5<br>(94.2) |
| RE <sub>1</sub><br>(60 mg·L <sup>-1</sup> )      | 56.9 ± 0.446<br>(91.1) | 80.8 ± 0.775<br>(89.2) | 0.095 2 ± 0.022 3<br>(90.7)  | 0.120 ± 0.016 0<br>(96.4)   | 0.052 8 ± 0.000 0<br>(96.8) | 0.553 ± 0.021 1<br>(93.8) |
| RE <sub>2</sub><br>(100 mg·L <sup>-1</sup> )     | 56.9 ± 2.04<br>(91.0)  | 70.8 ± 2.89<br>(78.2)  | 0.092 8 ± 0.045 4<br>(88.4)  | 0.119 ± 0.056 3<br>(95.6)   | 0.051 0 ± 0.000 0<br>(93.3) | 0.548 ± 0.025 5<br>(92.9) |
| RE <sub>3</sub><br>(300 mg·L <sup>-1</sup> )     | 34.4 ± 1.07<br>(55.0)  | 65.0 ± 1.14<br>(71.8)  | 0.092 2 ± 0.033 2<br>(87.8)  | 0.118 ± 0.033 4<br>(95.0)   | 0.049 2 ± 0.000 0<br>(90.2) | 0.553 ± 0.016 2<br>(93.7) |
| AR <sub>1</sub> + RE <sub>1</sub><br>(3.0 + 60)  | 56.9 ± 2.04<br>(62.8)  | 30.0 ± 1.14<br>(33.1)  | 0.068 7 ± 0.035 1<br>(65.4)  | 0.090 0 ± 0.014 5<br>(72.0) | 0.026 2 ± 0.014 5<br>(48.0) | 0.591 ± 0.067 5<br>(100)  |
| AR <sub>2</sub> + RE <sub>1</sub><br>(3.5 + 60)  | 55.5 ± 0.447<br>(88.8) | 40.5 ± 1.91<br>(44.7)  | 0.080 0 ± 0.045 5<br>(76.2)  | 0.101 ± 0.015 5<br>(80.8)   | 0.036 6 ± 0.000 0<br>(67.0) | 0.581 ± 0.035 0<br>(98.5) |
| AR <sub>3</sub> + RE <sub>1</sub><br>(4.5 + 60)  | 56.4 ± 3.12<br>(90.2)  | 52.6 ± 1.69<br>(58.1)  | 0.092 0 ± 0.046 7<br>(87.7)  | 0.113 ± 0.013 4<br>(90.4)   | 0.048 6 ± 0.014 5<br>(89.0) | 0.569 ± 0.022 7<br>(96.5) |
| AR <sub>1</sub> + RE <sub>2</sub><br>(3.0 + 100) | 28.5 ± 1.90<br>(45.6)  | 24.0 ± 1.73<br>(26.5)  | 0.056 8 ± 0.015 6<br>(54.1)  | 0.078 1 ± 0.014 4<br>(62.5) | 0.020 2 ± 0.014 6<br>(37.0) | 0.578 ± 0.037 6<br>(97.9) |
| AR <sub>2</sub> + RE <sub>2</sub><br>(3.5 + 100) | 39.8 ± 3.60<br>(63.7)  | 35.9 ± 1.20<br>(39.6)  | 0.064 8 ± 0.014 7<br>(61.7)  | 0.085 8 ± 0.012 2<br>(68.6) | 0.029 5 ± 0.017 8<br>(54.0) | 0.562 ± 0.0621<br>(95.3)  |
| AR <sub>3</sub> + RE <sub>2</sub><br>(4.5 + 100) | 55.1 ± 1.60<br>(88.2)  | 51.7 ± 2.48<br>(57.1)  | 0.085 1 ± 0.057 8<br>(81.0)  | 0.106 ± 0.023 4<br>(84.8)   | 0.045 6 ± 0.000 0<br>(83.4) | 0.561 ± 0.030 2<br>(95.1) |
| AR <sub>1</sub> + RE <sub>3</sub><br>(3.0 + 300) | 22.1 ± 2.38<br>(35.4)  | 16.1 ± 1.99<br>(17.8)  | 0.030 8 ± 0.015 8<br>(29.3)  | 0.052 1 ± 0.018 8<br>(41.7) | 0.004 5 ± 0.000 0<br>(8.24) | 0.544 ± 0.0703<br>(92.2)  |
| AR <sub>2</sub> + RE <sub>3</sub><br>(3.5 + 300) | 35.4 ± 1.42<br>(56.6)  | 31.4 ± 1.63<br>(34.7)  | 0.048 8 ± 0.045 6<br>(46.5)  | 0.069 8 ± 0.017 5<br>(55.8) | 0.021 2 ± 0.000 0<br>(38.8) | 0.536 ± 0.051 5<br>(90.9) |
| AR <sub>3</sub> + RE <sub>3</sub><br>(4.5 + 300) | 50.9 ± 2.20<br>(81.4)  | 46.8 ± 0.597<br>(51.7) | 0.069 7 ± 0.022 2<br>(66.4.) | 0.090 3 ± 0.025 6<br>(72.2) | 0.038 8 ± 0.000 0<br>(71.1) | 0.540 ± 0.067 4<br>(91.5) |
|                                                  | AR                     | RE                     | AR                           | RE                          | AR                          | RE                        |
| 极值 D                                             | 22.8                   | 9.30                   | 27.0                         | 9.60                        | 0.030 2                     | 0.030 4                   |
| F <sup>2)</sup>                                  | 48.6                   | 63.1                   | 54.1                         | 69.2                        | 19.5                        | 19.9                      |

1) 表中数据为平均值 ± 标准差; 2) 查 F 分布表得  $F(0.05) = 19.0$

5 项指标变化相互比较发现,复合处理下,Chl 和  $F_v/F_m$  的降幅范围分别为 9.14% ~ 24.5% 和 9.53% ~ 22.8%,较  $P_n$  (22.8% ~ 84.7%)、Hill 反应速率 (15.5% ~ 73.4%) 和  $Mg^{2+}$ -ATPase 活性 (14.5% ~ 71.5%) 小,说明 AR 与 La(Ⅲ)复合处理对各指标的影响程度不同.本研究进一步将不同复

合处理下  $P_n$  与其余 4 项指标做相关性分析发现(如表 2), $Mg^{2+}$ -ATPase 活性- $P_n$  和 Hill 活力- $P_n$  的  $R^2$  分别为 0.957 和 0.960,较 Chl- $P_n$  (0.836) 和  $F_v/F_m$ - $P_n$  (0.813) 大,说明 AR + La(Ⅲ) 处理下,4 个参数对  $P_n$  影响不一致.其中 Hill 反应速率与  $Mg^{2+}$ -ATPase 活性的变化是限制  $P_n$  的主要因素.

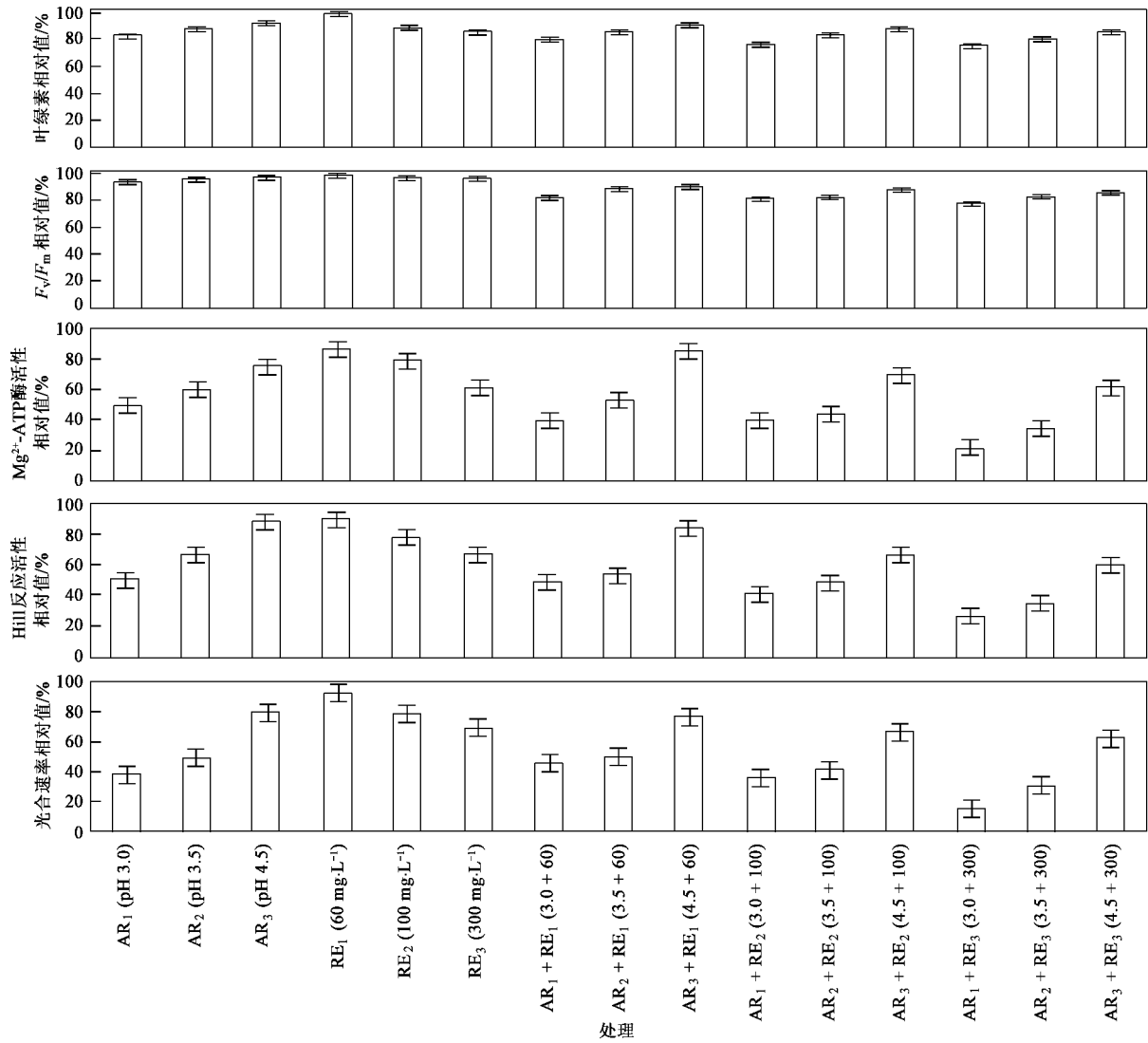


图 1 酸雨与镧对大豆幼苗光合作用的复合影响

Fig.1 Combined effects of acid rain and La(Ⅲ) on the photosynthesis of soybean seedling

表 2 酸雨与镧对大豆幼苗  $P_n$  与 Chl 含量、 $F_v/F_m$ 、Hill 反应活性、 $Mg^{2+}$ -ATPase 活性的相关性分析 ( $R^2$ )<sup>1)</sup>

Table 2 The correlation coefficients of some regression equations from the relationship between Chl,  $Mg^{2+}$ -ATPase activity, HRA,  $F_v/F_m$  and  $P_n$  ( $R^2$ )

| 指标    | Chl- $P_n$ | $F_v/F_m$ - $P_n$ | $Mg^{2+}$ -ATPase 活性- $P_n$ | Hill 活力- $P_n$ |
|-------|------------|-------------------|-----------------------------|----------------|
| $R^2$ | 0.836 *    | 0.813 *           | 0.957 *                     | 0.960 **       |

1) \* 表示显著 ( $p < 0.05$ ), \*\*表示极度显著 ( $p < 0.001$ ),  $n = 16$

3 结论

(1) AR (pH 3.0、3.5、4.5) 与 La(Ⅲ) (60、100、300  $mg \cdot L^{-1}$ ) 两两复合后处理较单一处理对大豆幼苗生长的抑制作用更加明显,两者呈协同效应.且随 AR 的 pH 值降低,RE 浓度增加,伤害效应越明显.

(2) 光合作用各参数变化规律显示: AR 与

La(Ⅲ)复合处理对大豆幼苗光合作用的影响规律与生长指标相似,两者亦呈协同效应.相同处理下 $F_v/F_m$ 和Chl的降幅较 $P_n$ 、Hill反应速率和 $Mg^{2+}$ -ATPase活性低,表明各光合参数对2个胁迫因子的敏感程度存在差异.

(3)进一步相关性分析结果显示:复合处理下光合参数 $P_n$ 的变化主要受Hill反应速率与 $Mg^{2+}$ -ATPase活性的影响.表明AR与La(Ⅲ)复合处理对植物光合作用各环节的影响程度及作用机制存在差异,致使各参数变化幅度不同.

#### 参考文献:

- [1] Feng Z W, Miao H, Zhang F Z, *et al.* Effects of acid rain deposition on terrestrial ecosystems and their rehabilitation strategies in China[J]. J Environ Sci, 2002, **14**(2):227-233.
- [2] 孟赐福,姜培坤,曹志洪,等.酸雨对植物的危害机理及其防治对策研究进展[J].浙江农业学报,2008, **20**(3):208-212.
- [3] 倪家骥.稀土生物无机化学[M].(第二版).北京:科学出版社,2002.5-26.
- [4] Zhang Y F, Yao M, Shao C Y, *et al.* Effect of simulated acid rain on transport of the rare earth elements in soil column[J]. Environ Chem, 2005, **24**(4):375-381.
- [5] 秦俊法,陈祥友,李增禧.稀土的生物学效应[J].广东微量元素科学,2002, **9**(3):1-16.
- [6] 邱琳,王娜,周青.镧对酸雨胁迫下高粱种子萌发及POD活性和MDA含量的影响[J].中国生态农业学报,2009, **17**(2):343-347.
- [7] 刘荣坤,胡艳,李永政.沈阳陨石山森林公园SO<sub>2</sub>污染现状植物反应的研究[J].生态学杂志,1998, **17**(2):26-31.
- [8] 陆晓明,王松华.叶面喷药对提高大豆幼苗抗酸雨胁迫的影响[J].热带作物学报,2007, **28**(3):42-45.
- [9] 姜照伟,翁伯琦,黄元仿,等.施用稀土元素镧对南非马唐生长及若干生理特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2008, **14**(4):713-720.
- [10] 朱广廉,钟海文,张爱琴.植物生理学实验[M].北京:北京大学出版社,1990.51.
- [11] 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.
- [12] 王建波,孙国荣,陈刚,等. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫下星星草幼苗叶片PSⅡ光能利用和耗散与培养基质渗透势的关系[J].生态学报,2006, **26**(1):115-121.
- [13] Sun J X, Zhao H, Wang Y Q. Study on the contents of trace rare earth elements and their distribution in wheat and rice samples by RNAA[J]. J Radioan Nucl Ch Ar, 1994, **179**(2):377-383.
- [14] 何跃君,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.
- [15] Zhang Z Y, Wang Y Q, Li F L, *et al.* Distribution characteristics of rare earth elements in plants from a rare earth ore area[J]. J Radioan Nucl Ch Ar, 2002, **252**(3):461-465.
- [16] Liang T, Ding S M, Song W C, *et al.* A review of fractionations of rare earth elements in plants[J]. J Rare Earth, 2008, **26**:7-15.
- [17] Liao B H, Liu H Y, Zeng Q R, *et al.* Complex toxic effects of Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, and acid rain on growth of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. Environ Int, 2005, **31**:891-895.
- [18] Wang X P, Shan X Q, Zhang S Z, *et al.* Distribution of rare earth elements among chloroplast components of hyperaccumulator *Dicranopteris dichotoma* [J]. Anal Bioanal Chem, 2003, **376**:913-917.
- [19] Wytenbach A, Tobler L, Schleppi P. Variation of the rare earth element concentrations in the soil, soil extract and in individual plants from the same site[J]. J Radioan Nucl Ch Ar, 1998, **231**:101-106.
- [20] 童贯和.模拟酸雨致酸土壤对小麦幼苗生长发育的影响[J].农村生态环境,2005, **21**(1):47-50.
- [21] 魏湘潭,于晓英,熊璇,等.酸雨对观赏植物伤害机理的研究进展[J].林业调查规划,2009, **34**(2):37-40.