

酸雨与稀土镧对大豆幼苗光合光反应复合影响的时间效应研究

梁婵娟, 葛玉晴, 吕霞, 周青, 邹华

(江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:采用水培法研究酸雨(AR)与稀土镧(La)对大豆幼苗叶片光合光反应复合影响的时间效应,旨在探究复合污染因子对植物自修复过程的影响。结果表明,较之不同 pH 值 AR(pH3.0、4.0)和不同剂量 La(60、300 mg·L⁻¹)的单一作用,复合处理对大豆幼苗光合光反应活性抑制程度较大,延缓各参数恢复进程(恢复拐点滞后),恢复程度较小,明显影响了植物的自修复能力。净光合速率 P_n 与各光合参数相关性分析结果显示:复合处理组的植物在修复过程中, P_n 变化主要受 Chl、Hill 反应活性的影响, Mg^{2+} -ATPase 活性对 P_n 的制约最小,且随着时间的推移,AR 与 La 复合处理组各光合参数的恢复进程不同步,自修复能力受胁迫强度和胁迫方式的影响。

关键词:酸雨(AR);稀土镧(La);大豆幼苗;光合光反应;时间效应

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2174-04

Time-effects of Combined Treatments of Simulated Acid Rain and Lanthanum on Photosynthesis of Soybean Seedlings

LIANG Chan-juan, GE Yu-qing, LÜ Xia, ZHOU Qing, ZOU Hua

(School of Environment and Civil Engineering Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Time-effects of combined treatment of simulated acid rain (AR) and Lanthanum (La) on photosynthesis in soybean seedling were investigated under hydroponic conditions in order to explore the combined effects on the recovery process of plant. The results indicated that the degree of inhibition on photosynthetic parameters in seedlings with combined treatments was higher than that treated with the single AR (pH3.0, 4.0) or La (60, 300 mg·L⁻¹). Compared with the single treatment, the combined treatment delayed the recovery process of the parameters (turning points of recovery were lagged) and the recovery degree was smaller, showing that the self-repairing ability of soybean seedlings was significantly affected. The correlation analysis between P_n and other photosynthetic parameters indicated that changes of P_n were mainly influenced by changes of Chl and Hill reaction activity, but not obviously affected by the change of Mg^{2+} -ATPase activity in seedlings under combined treatment. The results indicated that the self-repairing of each photosynthetic parameter was unsynchronized, and the self-repairing ability was related with stress intensity and stress mode.

Keywords: acid rain; Lanthanum; soybean seedlings; photosynthetic light reaction; time-effects

日益严重的酸雨(Acid Rain, AR)是制约农业生产和社会经济发展的重要因素之一^[1]。在酸雨多发农业区,土壤 pH 改变影响土壤中稀土的赋存状态,生物可利用性增加,对农作物的潜在威胁增大^[2]。前期研究结果表明^[3-4],较之单一污染,酸雨和稀土复合对农作物生

长和光合作用的抑制呈协同效应,光合作用受抑是导致植物生长缓慢、苗期素质趋劣的主要原因之一。在自然状态下,胁迫效应通常是时间函数,因而测定植物在胁迫停止后生理指标的时间变化,对客观、综合评估复合污染因子对植物的生理、生化代谢及植物自我修复过程的影响是非常有益的。本文以大豆为试材,以表征植物光合效率的 5 个重要参数:净光合速率(P_n)、叶绿素(Chl)、叶绿素荧光参数(Fv/Fm)、Hill 反应活性、 Mg^{2+} -ATPase 活性为考察目标,研究其在酸雨与稀土镧(La)复合处理结束后恢复期的变化,为客观评价酸

收稿日期:2011-04-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金(31000245);江南大学自主科研青年基金(JUSRP11007)

作者简介:梁婵娟(1978—),女,新疆石河子人,副教授,主要从事环境生态学研究。E-mail:lcj0803@yahoo.com.cn

雨危害及稀土农用的环境风险提供依据。

1 材料与方法

1.1 试材培养

大豆(*Glycine max*)“垦农18”种子用0.1% HgCl_2 消毒5 min,去离子水冲洗4次后置于恒温培养箱($25\text{ }^\circ\text{C} \pm 1.0\text{ }^\circ\text{C}$)中萌发。待胚根长至2 cm移入塑杯(口径10 cm)中,用去离子水培养,每杯3株,日换水1次,第2枚真叶出现,改用1/2Hoagland营养液、室温($25\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$)下培养,日光照12 h(光强12 000 lx),早晚各通气1次,添加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

配制模拟酸雨(AR)^[3],先配制pH1.0的AR母液,其中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的体积比为4.7:1(严格按照江苏地区自然降雨的化学组分)。以去离子水稀释为pH3.0、pH4.0的酸雨,并经PHS-29A酸度计校准。

用配制好的 LaCl_3 溶液($60, 300\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[9]浸泡大豆幼苗根部,每日处理6 h,连续处理7 d,对照植株(CK)用等量营养液浸泡。分别在第3、6 d,向叶片喷施不同pH值AR溶液,滴液为限,CK喷等量蒸馏水。处理结束后的第1、3、5、7 d选取大豆幼苗同一叶位的叶片(第3枚复叶)测定各光合指标。

本实验的处理组为:CK、 RE_1 ($60\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 RE_2 ($300\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、 AR_1 (pH3.0)、 AR_2 (pH4.0)、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_2$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_2$ 。各处理均为3杯,3次重复。差异显著性分析用LSD方法。

1.3 指标测定

叶绿素(Chl)含量参考文献[5];净光合速率(P_n)用CIRAS-1系统(PPS system International Ltd, UK)测定^[5];希尔反应速率和 Mg^{2+} -ATP酶活性测定参考文献[5],无细节改动;采用便携式调制叶绿素荧光仪(PAM-2100, Walz Germany),参考文献[5],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La对 P_n 复合影响的时间效应

图1(a)显示,单一AR组 P_n 先降后升,最大降幅为61.32%(AR_1)、57.15%(AR_2),第3 d出现恢复拐点,第7 d恢复至CK的49.13%(AR_1)、55.40%(AR_2),恢复程度受AR酸度制约。单一La组与单一AR组 P_n 走势相近,不同之处在于La组 P_n 降幅较小、恢复较好,且低浓度La组恢复程度明显优于高浓度组。

AR+La组 P_n 变化趋势与单一处理组相近,唯同一时段下 P_n 降幅较大,最终恢复程度较差,至第7 d, $\text{RE}_1 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_2$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_1$ 和 $\text{RE}_2 + \text{AR}_2$ 组 P_n 降幅分别为52.97%、48.79%、73.87%和66.56%。表明植物自修复过程中,复合处理对 P_n 抑制作用较强,恢复速度较慢,恢复程度较差。推测原因是AR和La复合处理对大豆幼苗Chl、 F_v/F_m 、Hill反应及 Mg^{2+} -ATPase活性抑制呈协同效应^[6],对后期恢复不利。另一方面,植物自身恢复能力有限,当受抑程度较大时,自身代谢适应性调整所耗时间明显延长,恢复程度较慢,最终恢复程度较差。

2.2 AR与La对Chl含量复合影响的时间效应

图1(b)显示Chl含量的动态变化过程。单一AR处理组Chl含量呈先降后升走势,最大降幅为16.94%(AR_1)、12.5%(AR_2),第3 d开始抬升,第7 d恢复达CK的91.94%(AR_1)、95.56%(AR_2),恢复程度与酸雨强度相关。单一La组与单一AR组Chl含量变化规律相近,不同在于La组Chl含量降幅较小,最终恢复较好,趋近于CK。AR+La组对Chl含量变化趋势与单一处理组相近,然同一时段下Chl降幅较大,最终恢复程度低于单一处理组,至第7 d, $\text{RE}_1 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_2$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_1$ 和 $\text{RE}_2 + \text{AR}_2$ 组Chl降幅分别达12.91%、10.89%、29.04%和18.55%。复合处理组Chl恢复效果较差,推测因AR、La破坏细胞内活性氧代谢平衡,活性氧积累加快叶绿素降解,并引发膜脂过氧化,加剧叶绿体被膜与片层结构的损害,进一步影响Chl对光能的捕获、传递和转换^[7-8],导致植物自身修复能力减弱。

2.3 AR与La对 F_v/F_m 复合影响的时间效应

如图1(c)所示,单一AR组 F_v/F_m 前3 d持续走低,最大降幅达21.23%(AR_1)、4.01%(AR_2),3 d后开始回升,至第7 d分别恢复到CK的98.55%(AR_1)、99.92%(AR_2),与酸雨酸度呈剂量-效应。单一La组 F_v/F_m 的变化趋势与单一AR组相近,差异在于La组 F_v/F_m 降幅较小,最终恢复效果较好,且 RE_1 组恢复程度明显优于 RE_2 组。复合处理组 F_v/F_m 曲线走势与单一处理组相近,唯同一时段下 F_v/F_m 降幅较单一AR和La组大,最终恢复程度较差,至第7 d, $\text{RE}_1 + \text{AR}_1$ 、 $\text{RE}_1 + \text{AR}_2$ 、 $\text{RE}_2 + \text{AR}_1$ 和 $\text{RE}_2 + \text{AR}_2$ 组 F_v/F_m 降幅分别为2.26%、1.94%、7.22%和5.0%。复合处理组 F_v/F_m 恢复有限,可能是AR和La的复合处理加强了对光反应中PS II的原初光能转化效率与同化力(ATP)合成等^[9]的抑制,继而进一步降低了光合作用中原初

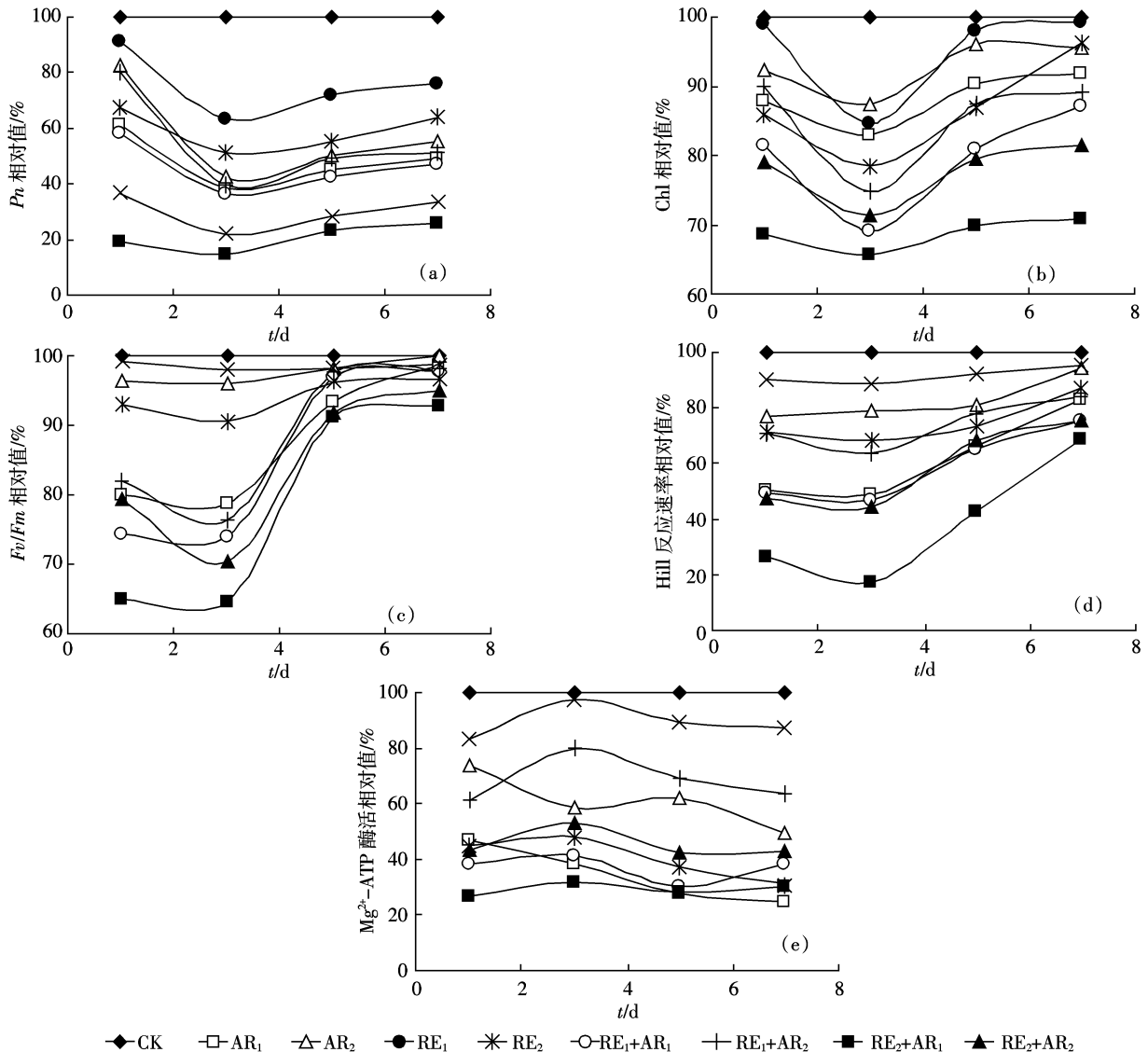


图 1 AR 与 La 对大豆幼苗光合作用的动态影响

Figure 1 Dynamic effects of acid rain and La on photosynthesis in soybean seedlings

光化学反应效率,导致恢复缓慢,最终恢复效果不佳。

2.4 AR 与 La 对 Hill 反应活性复合影响的时间效应

图 1(d)显示,与 CK 相比,随着时间的推移,AR₁组 Hill 反应活性呈先降后升走势,第 3 d 出现恢复拐点,AR₂组在胁迫停止后 Hill 活性立即呈渐升态势,表明酸雨强度既制约恢复程度也影响恢复进程。单一 La 组 Hill 反应活性的时间变化规律与 AR₁组相近,仅变幅较小,最大降幅为 11.21%(RE₁)、31.6%(RE₂),最终恢复程度较好。AR+La 组 Hill 反应活性变化规律与 AR₁和单一 La 组近似,不同在于同一时段下复合处理组 Hill 活性的降幅较大,恢复程度较小,至第 7 d,RE₁+AR₁、RE₁+AR₂、RE₂+AR₁和 RE₂+AR₂组 Hill 反应活性降幅分别为 24.40%、16.01%、30.92%和 24.43%。较之单一处理组,复合处理组 Hill 反应活性恢复进程明显受

阻,恢复缓慢。究其原因可能是 AR 与 La 加剧了 PS II 活性中心结构受损,进一步抑制了光能转换和电子传递速率^[6-7],后期循环电子传递被启动参与对光合机构运转的调控,Hill 反应活性虽有上升趋势,终因胁迫期受抑程度较大而无法恢复至正常水平。

2.5 AR 与 La 对 Mg^{2+} -ATPase 复合影响的时间效应

如图 1(e)所示,AR₁组 Mg^{2+} -ATPase 活性持续下降后趋于平稳;AR₂组 Mg^{2+} -ATPase 活性在第 3 d 略有回升后保持平稳,5 d 后又呈下降趋势,最终降幅达 50.40%,表明酸雨酸度高不仅制约 Mg^{2+} -ATPase 活性恢复程度也影响恢复进程。单一 La 组 Mg^{2+} -ATPase 活性变化不同于 AR 组,呈先升后降后趋于平稳态势,第 3 d 出现峰值点,RE₁组的最终恢复程度优于 RE₂组。复合处理组 Mg^{2+} -ATPase 活性变化趋势与 La

组较为相近,但恢复拐点滞后(第5 d),至第7 d,RE₁+AR₁、RE₁+AR₂、RE₂+AR₁和RE₂+AR₂组Mg²⁺-ATPase活性降幅分别为61.5%、36.3%、69.9%和57.2%。较之单一处理,复合处理组Mg²⁺-ATPase活性恢复进程明显滞后,恢复初期,AR和La增强了对细胞膜上酶系统的破坏,进一步降低光合磷酸化活力和磷酸化的偶联程度^[9-10],而随着时间的推移植物体内的稀土和H⁺逐渐被稀释,相对减缓了高浓度La和强度AR对酶系统的抑制,呈现出较好的恢复态势。

2.6 AR与La复合作用对大豆幼苗Pn与光反应参数的关系

由上述分析可知,AR和La对光合各参数恢复程度和恢复进程影响不尽一致。为进一步明晰内在关系,对Pn与其他4个光合参数进行相关性分析发现(表1),同一处理组中,Pn-Chl(0.969~1.000)、Pn-Hill(0.950~0.999)的相关性系数较Pn-Mg²⁺-ATPase(0.694~0.891)、Pn-Fv/Fm(0.927~0.989)大,且低剂量组(RE₁+AR₁、RE₁+AR₂)Chl/Hill反应活性与Pn显著相关,高剂量组(RE₂+AR₁)Chl与Pn极显著相关,表明恢复中复合处理组各光合参数变化对Pn的影响不一致,其中Chl影响最大,Hill反应速率次之,Mg²⁺-ATPase活性变化对Pn影响最小,与静态测定结果不同^[6]。说明随着时间的推移,AR与La复合作用对各光合参数的恢复程度和恢复进程的影响存在差异,使各参数对植物光合功能恢复的制约程度不同,表明植物受AR与La复合胁迫后光合作用的自修复机制较为复杂,既受胁迫强度又受胁迫方式的影响。

表1 AR与La复合对大豆幼苗Pn与Chl、Fv/Fm、Hill反应速率、Mg²⁺-ATPase活性的相关性分析(R²)

Table 1 The correlation coefficients of some regression equations from the relationship between Chl, Fv/Fm, Mg²⁺-ATPase activity, HRA and Pn

处理组	RE ₁ +AR ₁	RE ₁ +AR ₂	RE ₂ +AR ₁	RE ₂ +AR ₂
Pn-Chl	0.998*	0.998*	1.000**	0.969
Pn-Fv/Fm	0.927	0.989	0.986	0.951
Pn-Hill	0.999*	0.994	0.950	0.977
Pn-Mg ²⁺ -ATPase	0.768	0.884	0.694	0.891

注: *P<0.05, **P<0.1。

3 结论

(1)单一AR或La处理组的各光合参数(AR₁组Mg²⁺-ATPase除外)在第3 d出现恢复拐点(AR₂组Hill反应活性在第1 d就呈现恢复态势),且各光合参数的最终恢复程度受AR酸度和La浓度制约,呈明显

剂量-效应关系。

(2)较之单一AR或La处理组,复合处理对大豆幼苗光合反应活性抑制程度较大,延缓各参数恢复进程(恢复拐点滞后),恢复程度较小,显著影响了植物的自修复能力。

(3)Pn与各光合参数相关性分析结果显示:复合处理组的植物在修复过程中,Pn变化主要受Chl、Hill反应活性的影响,Mg²⁺-ATPase活性对Pn的制约最小,且随着时间的推移,AR与La复合处理组各光合参数的恢复进程不同步,自修复能力受胁迫强度和胁迫方式的影响。

参考文献:

- [1] 梁 骏,郑有飞,李 璐,等. 酸雨对土壤酸化和油菜中后期生长发育的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1043-1050.
LIANG Jun, ZHENG You-fei, LI Lu, et al. Effects of acid rain upon soil acidization and growth/development of rape crop in its middle-late stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 1043-1050.
- [2] 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.
- [3] Yang C L, LIN P, Liang J. Accumulation of rare earth elements in spinach and soil under condition of using REE and acid rain stress[J]. *Journal of Rare Earths*, 2002, 20(2): 132-138.
- [4] Li Y H, Yang C L, Liu J C, et al. Effects of Lanthanum on redox systems in plasma membranes of *Casuarina equisetifolia* seedlings under acid rain stress[J]. *Journal of Rare Earths*, 2003, 21(5): 577-581.
- [5] 徐丹瑶,周 青,梁婵娟. 模拟酸雨对大豆幼苗光合光反应的影响[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(2): 9-11.
XU Dan-yao, ZHOU Qing, LIANG Chan-juan. Effects of simulated acid rain on the photosynthetic reaction with the soybean seedlings[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(2): 9-11.
- [6] 梁婵娟,潘丹云,徐秋荣,等. 酸雨与镧对大豆幼苗生长的复合伤害效应研究[J]. 环境科学, 2010, 31(30): 1652-1656.
LIANG Chan-juan, PAN Dan-yun, XU Qiu-rong, et al. Combined injured effects of acid rain and Lanthanum on growth of soybean seedling[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(30): 1652-1656.
- [7] Liao B H, Liu H Y, Zeng Q R, et al. Complex toxic effects of Cd²⁺, Zn²⁺, and acid rain on growth of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. *Environment International*, 2005, 31: 891-895.
- [8] Huang X H, Zhou Q, Zhang G S. Advances on rare earth application in pollution ecology[J]. *Journal of Rare Earths*, 2005, 23(1): 5-11.
- [9] Liu J X, Zhou G Y, Yang C W, et al. Responses of chlorophyll fluorescence and xanthophyll cycle in leaves of *Schima superba* Gardn. & Champ. and *Pinus massoniana* Lamb. to simulated acid rain at Ding-hushaniosp Here Reserve, China[J]. *Acta Physiol Plant*, 2007, 29: 33-38.
- [10] Li Y H, Yan C L, Liu J C, et al. Effects of La³⁺ on ATPase activities of plasma membrane vesicles isolated from *Casuarina Equisetifolia* seedlings under acid rain stress[J]. *Journal of Rare Earth*, 2003, 21(6): 675-679.