

欧李幼苗荧光参数对两种植物生长调节剂的响应

魏亚娟¹, 汪季¹, 党晓宏¹, 贺俊玲⁴, 刘宗奇³, 张波², 解云虎¹,

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古鄂尔多斯市环境保护局, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;
3. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4. 杭锦旗农业技术推广中心, 内蒙古 杭锦旗 017400)

摘要: [目的] 探讨多效唑(PP₃₃₃)和生根粉(GGR₆)两种植物生长调节剂对欧李(*Cerasus humilis*)叶绿素荧光参数的影响,为欧李幼苗的壮苗栽培技术提供科学理论依据。[方法] 采用单因素分析法,以 1 年生欧李幼苗为研究对象,分别设置 0,50,100,150 和 200 mg/L 5 个浓度梯度的 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 溶液对欧李幼苗进行蘸根处理,采用 PMA2500 叶绿素荧光仪对荧光参数进行测定。[结果] 电子传递效率(ETR)、实际光化学量子效率(ΦPSII)、光化学猝灭(q_p)和最大光化学效率(F_v/F_m)在一定浓度范围内,随着 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 溶液浓度的增大而增大,非光化学猝灭(q_N)随着 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 溶液浓度的增大而减小。[结论] 欧李幼苗生长发育促进效果最佳的植物生长调节剂为 GGR₆,最佳浓度为 200 mg/L,且同浓度 GGR₆ 对欧李幼苗荧光参数促进作用优于 PP₃₃₃。

关键词: 植物生长调节剂; 欧李; 叶绿素荧光参数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0064-06

中图分类号: S723.1

文献参数: 魏亚娟, 汪季, 党晓宏, 等. 欧李幼苗荧光参数对两种植物生长调节剂的响应[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 64-69. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.011. Wei Yajuan, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Response of fluorescence parameters to two different plant growth regulators in *Cerasus humilis* seedlings[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 64-69.

Response of Fluorescence Parameters to Two Different Plant Growth Regulators in *Cerasus Humilis* Seedlings

WEI Yajuan¹, WANG Ji¹, DANG Xiaohong¹, HE Junling⁴, LIU Zongqi³, ZHANG Bo², XIE Yunhu¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Ordos Environmental Protection Bureau, Ordos, Inner

Mongolia 017000, China; 3. Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot, Inner Mongolia 010010,

China; 4. Hangjin Banner Agricultural Technology Promotion Center, Hangjin Banner, Inner Mongolia 017400, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of paclobutrazol(PP₃₃₃) and rooting powder(GGR₆) on chlorophyll fluorescence parameters of *Cerasus humilis*, in order to provide scientific and theoretical basis for strong seedling cultivation techniques of *C. humilis* seedlings. [Methods] Single factor analysis was used to study the 1-year-old *C. humilis* seedlings, which were respectively dipped into PP₃₃₃ and GGR₆ with a concentration of 0, 50, 100, 150 and 200mg/L, and the fluorescence was measured by PMA2500. [Results] With the increasing concentration of PP₃₃₃ and GGR₆, the electron transfer efficiency (ETR), actual photochemical quantum efficiency (ΦPSII), photochemical quenching (q_p) and maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) were increased, while the non-photochemical quenching(q_N) decreased. [Conclusion] The best plant growth regulator was GGR₆, and the optimal concentration was 200 mg/L. With the same concentration, the effect of GGR₆ on the fluorescence parameters of *C. humilis* seedlings was better than that of PP₃₃₃.

Keywords: plant growth regulators; *Cerasus humilis*; chlorophyll fluorescence parameters

收稿日期: 2017-06-14

修回日期: 2017-07-14

资助项目: 引进国外先进林业科学技术项目“人工调控荒漠灌丛生态空间构型技术引进”(2015-4-22)

第一作者: 魏亚娟(1994—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 在读硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: 2404336139@qq.com.

通讯作者: 汪季(1957—), 男(汉族), 山东省济南市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: wangji1957@163.com.

欧李(*Cerasus humilis*) 树体低矮、根蘖发达、适应性强,属蔷薇科櫻桃属,是中国所特有野生果树^[1]。其分布范围广泛,主要分布于东北地区、华北地区和西北地区。欧李具有较高的药用价值和经济价值且果实营养价值丰富。由于欧李在城市环境绿化、改良土壤结构、保水固土和治理荒山等方面具有特殊效果和利用价值,已成为中国干旱地区和沙漠地区生态环境建设的优良树种^[2]。此外,欧李属于低耗水量植物,有利于节约水资源,对于蒸发量大于降水量的干旱(半干旱)地区是非常适用的经济植物^[3]。但欧李生长环境恶劣,导致其植株矮小,影响其经济效益和生态效益的发挥。

PP₃₃₃,又名多效唑,是一种新型的、含氮杂环化合物,其农业应用价值在于它对作物生长的控制效应,通过抑制植物体内赤霉素的合成,从而降低赤霉素的含量,抑制植物茎顶端分生组织细胞分裂,使其节间变短,导致植株矮化^[4]。同时提高植物叶绿素含量和光合作用、抗衰老和抗倒伏能力^[5-6],进而改善作物品质,提高产量。

GGR₆,是生根粉的一种,是一种绿色无公害、非激素型植物生长调节剂。通过调节植物体内内源激素含量和酶的活性,促进细胞分裂和生长,从而促进植物生长发育和根的分蘖、增强植物抗逆能力和提高作物产量^[7-8]。但目前鲜有关于 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李幼苗进行蘸根处理,进而影响叶绿素荧光参数的研究报道。

因此,本文拟通过 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下欧李叶绿素荧光参数的变化特征,分析欧李对不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 溶液的光响应趋势,从而筛选出最适宜欧李生长发育的溶液类型及其浓度,以期为欧李幼苗的壮苗栽培技术提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市乌审旗的国营林场,该区域四季分明、气温年较差大,年平均最高气温 15.6 ℃,年平均最低气温 -9.9 ℃,属于温带极端大陆性季风气候。由于该地区日照充足、蒸发强烈且降雨稀少,年均降雨量仅有 315.5 mm,而且多集中于 7—9 月。土壤主要为风沙土,植被以沙生植被为主。

1.2 试验设计

试验材料为生长较为均一、长势良好的一年生欧李幼苗,试验所用的植物生长调节剂为 PP₃₃₃ 和 GGR₆。设计 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 溶液浓度均为 50, 100, 150 和 200 mg/L,两者以蒸馏水为统一对照,分别表

示为蒸馏水(CK), P₅₀, P₁₀₀, P₁₅₀, P₂₀₀ 和 G₅₀, G₁₀₀, G₁₅₀, G₂₀₀, 用不同溶液对欧李幼苗进行蘸根(2 h)处理,于 2016 年 4 月底移栽于上底直径 24 cm、下底直径 16 cm、高为 26 cm 的花盆内,盆内装有风沙土。每盆栽植 1 株,9 次重复,共 81 盆。按照当地近 30 a 的 4—9 月平均降水量补充水分,其他管护条件一致。

1.3 叶绿素荧光参数测定

试验在晴天无风的上午 8:00—11:00 之间进行,共测定 9 个处理,每个处理选择 6 株长势均一的幼苗,选取幼苗株高 2/3 处的成熟叶片进行测定,共计测量 54 株。测定前,将被测量叶片进行充分暗适应处理 20 min。然后采用 PMA2 500 叶绿素荧光仪(德国产)对欧李幼苗叶绿素荧光参数进行测定。测量并计算其电子传递效率(ETR)、光化学猝灭(q_P)、实际光化学量子效率($\Phi PS II$)、非光化学猝灭(q_N)和最大光化学效率(F_v/F_m)以及其他荧光参数。其中, ETR, q_P , q_N 的测量结果直接在电脑中保存。而 F_v/F_m , $\Phi PS II$ 的计算公式如下:

$$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m \quad (1)$$

式中: F_m ——暗适应下最大荧光产量; F_o ——初始荧光;

$$\Phi PS II = (F_m' - F_s)/F_m' \quad (2)$$

式中: F_s ——光照下的稳定荧光; F_m' ——光照下的最大荧光。

1.4 数据处理

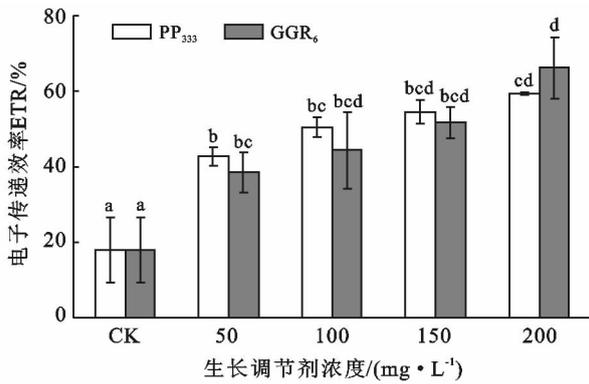
运用 Microsoft Excel 2007 进行试验数据统计分析,采用 SPSS 17.0 软件进行单因素分析法(one-way ANOVA)对不同数据组间的差异比较,并应用主成分分析法对数据进行择优分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李叶绿素荧光参数的影响

2.1.1 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对 ETR 的影响

ETR 表示电子传递效率,也可以表示 PS II 电子传递速率。反映了在实际光强前提下,表观电子传递速度的快慢^[9]。如图 1 所示,不同浓度处理欧李幼苗,叶片 ETR 均表现为不同程度增加的趋势。最大值出现在 G₂₀₀ 处理下,其值为 66.3;最小值为 CK,其值为 18.0。不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 溶液对欧李 ETR 的促进作用较对照(CK)均显著提高($p < 0.05$),但同一浓度的 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李 ETR 的促进作用差异不显著($p > 0.05$)。说明 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 均能较大提高欧李光合电子传递效率和 PSII 光合活性,且同一浓度的 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李幼苗的促进作用差异不明显。



注:不同小写字母表示不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李 ETR 的影响

2.1.2 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对 Φ PS II 的影响

Φ PS II 被用来暗示实际光化学量子效率,它是反映植物叶片光合电子传递速度的快慢^[10]。如图 2 所示,在 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的浓度为 0~200 mg/L 范围内,欧李叶片 Φ PS II 随 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的增大都呈现增大的趋势。当溶液浓度为 50 mg/L 时,PP₃₃₃ 处理下欧李叶片 Φ PS II 较 GGR₆ 处理增加 16.2%。在 150, 200 mg/L 的 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下, Φ PS II 值分别为 0.479, 0.584, 0.537, 0.481。GGR₆ 较 PP₃₃₃ 差异显著 ($p < 0.05$)。说明 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 浓度越高, Φ PS II 效率越高,则表明植物进行光合作用产生光合产物速度越快,越有利于植物进行光合作用。

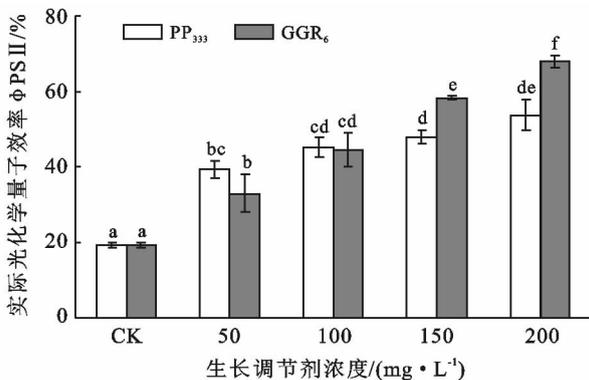


图 2 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李 Φ PS II 的影响

2.1.3 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对 q_N 的影响

q_N 为非光化学猝灭系数,它表示 Φ PS II 中聚光色素吸收的光能以热能的形式耗散掉的部分光能^[11],同时也反映了植物耗散过剩光能为热的能力,即光保护能力^[12]。如果中心色素吸收了过量的光能,却未能及时耗散,可能会损伤光和机构。如图 3 所示,随着 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 浓度逐渐增大,欧李叶片 q_N 呈现逐渐减小趋势。同一浓度的 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下,浓

度为 50 和 100 mg/L 时差异不显著 ($p > 0.05$), q_N 值分别为 0.545, 0.589, 0.477, 0.529; 浓度为 150 和 200 mg/L 时差异显著 ($p < 0.05$), q_N 值分别为 0.305, 0.459, 0.143, 0.431。说明随着溶液浓度逐渐增大,欧李叶片光合传输能力逐渐减弱,光能用于光化学反应的比例下降,热耗散减少,植物光保护能力增强。

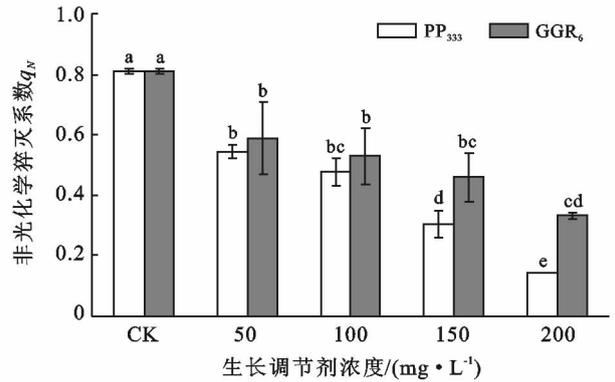


图 3 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李 q_N 的影响

2.1.4 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对 q_P 的影响

q_P 表示光化学猝灭系数,反映了 Φ PS II 中用于光化学电子传递的能量占聚光色素吸收光能的多少, q_P 反映了植物光合活性的高低^[13]。同时, q_P 在一定程度上也反映了光 Φ PS II 反应中心的开放程度^[14]。如图 4 所示,在 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的浓度为 50~200 mg/L 范围内,欧李叶片 q_P 随着 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的增加均表现为增加的趋势。各浓度 GGR₆ 较 PP₃₃₃ 的促进作用明显,PP₃₃₃, GGR₆ 对欧李 q_P 的最大影响程度分别较 CK 增加 299.9% (P₁₅₀) 和 296.5% (G)。同一浓度 PP₃₃₃, GGR₆ 处理下,浓度为 50 mg/L 差异显著 ($p < 0.05$), q_P 值为 0.511, 0.707, G₁₅₀ 和 G₂₀₀ 之间差异显著 ($p < 0.05$), q_P 分别为 0.830, 0.912。说明在一定浓度范围内,随着 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的浓度增大,欧李叶片光合活性越高,欧李抗逆能力增强。

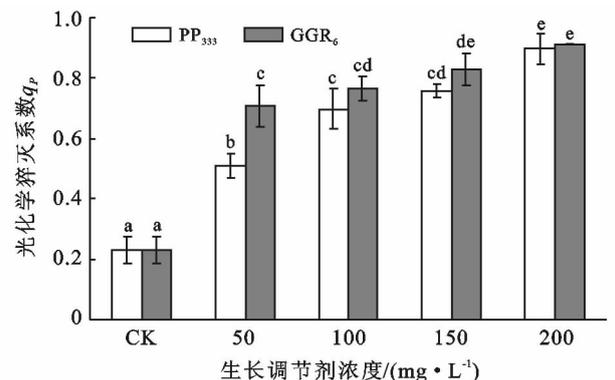


图 4 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李 q_P 的影响

2.1.5 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对 F_v/F_m 的影响

F_v/F_m 表示最大光化学效率,它是检测光抑制的可靠指标^[15],反映了植物叶片 ΦPS II 利用光能力的大小和最大原初光能捕获效率的大小。该指标不受生长条件和物种的限制。如图 5 所示,在 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的浓度为 50~200 mg/L 范围内,随着 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 浓度不断增大,F_v/F_m 也不断增大。但 PP₃₃₃ 处理下 F_v/F_m 较 GGR₆ 增长较为缓慢。PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对 F_v/F_m 的影响程度分别较 CK 增加了 0.59%,1.52%,2.49%,2.65%和 1.47%,2.09%,2.43%,3.33%。同浓度的 GGR₆ 对欧李 F_v/F_m 的促进作用整体比 PP₃₃₃ 略大,但是差异不显著(p>0.05)。说明 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的溶液蘸根处理欧李幼苗,对叶片 F_v/F_m 促进作用不明显,因而对欧李最大原初光能捕获效率提升幅度较小。

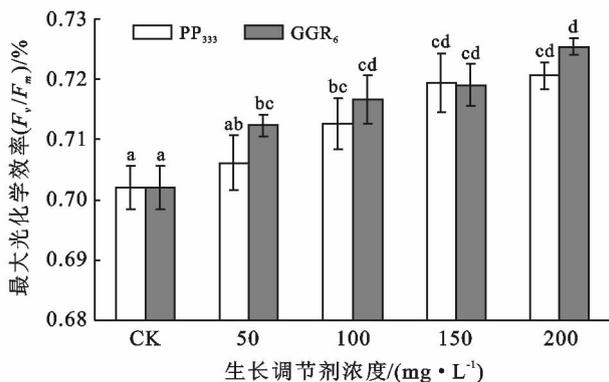


图 5 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李 F_v/F_m 的影响

2.2 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的主成分分析

对不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下,对欧李叶绿素荧光指标进行主成分分析。由表 1 可知,选取的叶绿素荧光指标为:ETR,ΦPS II,q_P,F_v/F_m,q_N,运用 SPSS 19.0 对这 5 个指标进行主成分分析。从表中可以看出,第 1 个主成分的累积贡献率为 91.04%,从而提供了 91.04%的相关信息。其他 4 个主成分只提供了 8.96%的相关信息。因此,只要求出第 1 个主成分即可,并对第 1 个主成分进行进一步分析。

表 1 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下叶绿素荧光指标的主成分分析

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
ETR	4.55	91.04	91.04
ΦPS II	0.23	8.96	95.72
q _P	0.14	4.28	98.52
F _v /F _m	0.06	1.48	99.64
q _N	0.02	0.36	100.00

由表 2 得出:第 1 主成分:F = 0.459 6X₁ + 0.446 1 X₂ + 0.450 6X₃ + 0.451 1 X₄ - 0.428 0X₅

然后根据建立得 F 值、第 1 主成分和综合主成分值进行排序。由不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下,对欧李叶绿素荧光指标影响的主成分综合评价结果(表 3)可知:不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下,叶绿素荧光指标的综合主成分顺序:G₂₀₀ > P₂₀₀ > G₁₅₀ > P₁₅₀ > G₁₀₀ > P₁₀₀ > G₅₀ > P₅₀ > CK,浓度为 G₂₀₀ 时最大,浓度为 CK 时最小。

表 2 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下叶绿素荧光指标的主成分载荷

指标	ETR	ΦPS II	q _P	F _v /F _m	q _N
主成分	0.459 6	0.446 1	0.450 6	0.451 1	-0.428

表 3 不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 处理下叶绿素荧光指标的综合评估

浓度	第 1 主成分	排序
CK	-4.342 5	9
P ₅₀	-1.458 6	8
P ₁₀₀	-0.074 2	6
P ₁₅₀	1.078 8	4
P ₂₀₀	2.117 3	2
G ₅₀	-1.099 9	7
G ₁₀₀	-0.024 9	5
G ₁₅₀	1.085 2	3
G ₂₀₀	2.718 8	1

即本试验中,在 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的浓度为 50~200 mg/L 范围内,在 GGR₆ 的浓度为 200 mg/L 时,欧李的叶绿素荧光指标最佳,最有利于欧李生长发育。

3 讨论与结论

3.1 讨论

叶绿素荧光参数是描述植物光合作用的常见指标,在探究植物光反应中被普遍应用^[16]。本文通过不同浓度 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 对欧李一年生幼苗蘸根处理后,欧李幼苗的叶绿素荧光参数均发生不同程度的变化。

在前人的研究中发现,施用 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 能够提高植物叶片叶绿素含量和增强光合作用,提高植物的抗逆性,提高作物产量。本研究发现,在 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 的浓度为 50~200 mg/L 范围内,当 PP₃₃₃ 和 GGR₆ 浓度为 200 mg/L 时,欧李幼苗叶绿素荧光参数最大。这与尹婷等^[17]、游鸯^[18] 分别对无忧花、藤本

月季的研究结果不同。其原因是不同植物种类对 PP_{333} 和 GGR_6 的敏感程度不同^[19]。在 PP_{333} 和 GGR_6 浓度为 50~200 mg/L 内,各叶绿荧光参数均显著高于 CK(除 F_v/F_m 外)($p < 0.05$),说明适宜浓度的 PP_{333} 和 GGR_6 溶液对欧李幼苗作用显著,这与王猛^[20]对杨柴和董倩等^[21]对黄连木研究结果不相同。该原因还不明确,需要在今后的试验中进一步探讨。

在 PP_{333} 和 GGR_6 浓度为 50~200 mg/L 范围内,通过不同浓度 PP_{333} , GGR_6 蘸根处理欧李幼苗,根据欧李 ETR, $\Phi PS II$, q_P 和 q_N 变化趋势,得出 200 mg/L 的 PP_{333} , GGR_6 对 ETR, $\Phi PS II$, q_P 和 q_N 作用效果最显著。其原因是 PP_{333} 和 GGR_6 溶液能够促进欧李体内光合产物的运输。随着浓度 PP_{333} 和 GGR_6 浓度增大,欧李幼苗光合色素分子对光能的吸收、转换和传递速度加快。欧李叶片接受和传递光合电子的能力增强,光和潜力升高,光反应的化学能量增加,聚光色素耗散的能量减少,光和机构的过剩能量减少,光机构得到保护,使 PS II 反应中心的开放程度增大和原初光能转换效率的增强,促进了光合碳同化提供 ATP 和 NADPH 形式不稳定化学能。使光合电子传递加快,促进了欧李叶片光合碳同化作用,使更多的二氧化碳转化成稳定的化学能存储在糖类化合物中,促进了欧李的光合作用。该结果与李源等^[22]对澳大利亚太阳扇叶片的研究结果一致。

在 PP_{333} 和 GGR_6 浓度为 50~200 mg/L 范围内, PP_{333} 的趋势线变化较为平缓,变化范围在 0.702~0.721; GGR_6 的趋势线呈上升趋势变化,变化范围在 0.702~0.725 之间。但变化范围不大。该结果与于永畅等^[23]对春兰的结论不同。其原因是当植物没有受到外界胁迫时, F_v/F_m 变化范围不明显,主要由植物自身决定。当植物受到外界环境胁迫时,其值会显著下降^[24]。该结果还说明了 GGR_6 较 PP_{333} 对欧李叶片 F_v/F_m 促进作用强,但 PP_{333} 和 GGR_6 的作用方式不同。其原因是在 PS II 活性中心, GGR_6 能够促进光合作用原初反映过程和相关酶的活性,使欧李 PS II 的原初光能转化效率及 PS II 潜在光合作用活力受到促进。目的是促进地上部分和地下部分分泌赤霉素、细胞分裂素,同时增加植株内相关酶的活性,从而增加植物地上生物量和地下生物量和提高植物光合能力,而 PP_{333} 的作用主要是抑制了内源赤霉素、脱落酸和乙烯的合成,从而抑制植物分生组织细胞分裂使植株矮化。同时 PP_{333} 促进了植物叶片叶绿素含量和可溶性蛋白含量,提高欧李光合作用。该结论与刘志梅等^[25]对金银花的研究结果相似。也可能是由

于欧李幼苗 GGR_6 的敏感程度比 PP_{333} 高。根据主成分分析可知, G_{200} 的作用效果最佳。

本文仅研究了 50~200 mg/L 的 PP_{333} 和 GGR_6 溶液条件下欧李叶绿素荧光参数的变化,得出 200 mg/L 的 GGR_6 是欧李生长发育的最佳浓度。随着溶液浓度继续增加,是否存在更适合欧李光反应的浓度还有待于进一步研究。

3.2 结论

叶绿素荧光参数可以估测植物潜在光合能力和间接地判断欧李幼苗能否正常生长发育。本试验综合分析表明,在 PP_{333} 和 GGR_6 溶液作用下,ETR, $\Phi PS II$, q_P 和 F_v/F_m 的趋势线上升幅度较 PP_{333} 陡峭;尤其是当 PP_{333} 的浓度为 100 mg/L 时,这些参数的趋势线趋于平缓。而 q_N 的趋势线随 GGR_6 溶液浓度的上升,其下降幅度较 PP_{333} 平缓。 GGR_6 的浓度为 200 mg/L 时,欧李的叶绿素荧光指标最佳,对欧李的促进作用更大。说明 GGR_6 溶液更有利于欧李叶片光反应的进行,更有利于欧李幼苗的生长发育。

[参 考 文 献]

- [1] 张红,张艳敏,陈晓流,等. 欧李自交不亲和 S 基因的克隆及序列分析[J]. 西北植物学报,2008,28(5):876-881.
- [2] 陈赫男. 砂石山区优良水土保持先锋树种欧李引种及其效益研究[D]. 山东泰安:山东农业大学,2007.
- [3] 郑松州,汪季,张利文,等. 科尔沁沙地几种经济植物耗水特征研究[J]. 北方园艺,2013(16):64-68.
- [4] 王林闯,孙玉东,赵建锋,等. 不同浓度多效唑对辣椒苗期生长的影响[J]. 安徽农业科学,2016,44(34):14-15.
- [5] Jaleel C A, Manivannan P, Sankar B, et al. Paclobutrazol enhances photosynthesis and ajmalicine production in *Catharanthus roseus* [J]. Process Biochemistry, 2007, 42(11):1566-1570.
- [6] 陈晓光,王振林,彭佃亮,等. 种植密度与喷施多效唑对冬小麦抗倒伏能力和产量的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(6):1465-1470.
- [7] 唐中杰,房卫平,孙玉堂. GGR_6 号在棉花上应用效果研究[J]. 中国农学通报,2006,22(1):182-184.
- [8] 李淑娟,汪新川,李长慧. 叶面喷施植物生长剂对青海冷地早熟禾和青海中华羊茅产量的影响[J]. 草业科学,2010,27(7):68-71.
- [9] 冯伟,管涛,王晓宇,等. 沼液追施量对小麦叶绿素荧光动力学参数及产量的影响[J]. 华北农学报,2011,26(2):157-162.
- [10] 孙志勇,季孔庶. 干旱胁迫对 4 个杂交鹅掌楸无性系叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北林学院学报,2010,25(4):35-39.
- [11] 杨晓青,张岁岐,梁宗锁,等. 水分胁迫对不同抗旱类型

- 冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(5): 812-816.
- [12] 刘红梅, 新跃, 李先喆, 等. 基于叶绿素荧光参数的籼型杂交稻杂种优势分析[J]. 植物生理学报, 2014, 50(6): 855-860.
- [13] 施征, 史胜青, 张志翔, 等. 干旱与高盐对梭梭叶绿素荧光特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(3): 20-25.
- [14] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42(42): 313-349.
- [15] 赵丽丽, 吴佳海, 王普昶, 等. 高羊茅种质光合及叶绿素荧光参数对高温胁迫的响应[J]. 草地学报, 2015, 23(4): 811-817.
- [16] 张力思, 王洁, 艾呈祥, 等. 外源 NO 对干旱胁迫下君子兰幼苗光合作用的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 623-628.
- [17] 尹婷, 郑绍鑫, 王艺锦, 等. 植物生长调节剂 GGR₆ 对无忧花幼苗生长特性的影响[J]. 北方园艺, 2015(6): 76-79.
- [18] 游骞. 多效唑对藤本月季光合特性及叶片显微结构的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
- [19] 李曼清. 三种植物生长物质(GGR, IAA, PP333)对黄花风铃木幼苗生长及生理特性影响[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [20] 王猛. 复配土环境下 PP₃₃₃对杨柴光合及生理特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [21] 董倩, 王洁, 庞曼, 等. 生长调节剂对黄连木光合生理指标和荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(3): 484-490.
- [22] 李源, 何丙辉, 毛文韬, 等. 多效唑对太阳扇叶片叶绿素含量及其荧光参数的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(11): 97-103.
- [23] 于永畅, 张林, 王厚新, 等. ABA 和 PP₃₃₃对国兰低温胁迫及恢复中光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 农学学报, 2014, 4(4): 30-37.
- [24] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 不同水分处理下冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 63-66.
- [25] 刘志梅, 蒋文伟, 杨广远, 等. 干旱胁迫对3种金银花叶绿素荧光参数的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(4): 533-539.

(上接第 63 页)

- [13] Yan Xiaoyuan, Zhou Hu, Zhu Qinghe, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 130(6): 42-51.
- [14] 王艳玲, 王燕, 李凌宇, 等. 成土母质与利用方式双重影响下红壤团聚体的组成特征与稳定性研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 776-785.
- [15] 石芸, 杨宪龙, 张庆印, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626-1632.
- [16] 刘哲, 孙增慧, 吕贻忠. 长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(8): 1119-1128.
- [17] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
- [18] 张艺, 戴齐, 尹力初, 等. 增施或减施有机物料对长期培肥红壤性水稻土团聚体组成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, 5(1): 28-32.
- [19] Denef K, Six J. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization [J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(4): 469-479.
- [20] 魏世勇, 刘凡, 冯雄汉, 等. 针铁矿—高岭石二元体的微观结构与形成机制[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 320-330.