

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2018.50745

黄杰, 陈宗福, 尹丽英, 李曼清, 王凌晖, 滕维超. 三种外源植物激素对黄花风铃木幼苗生物量、叶绿素荧光参数及光合特性的影响[J]. 植物科学学报, 2018, 36(5): 745~754

Huang J, Chen ZF, Yin LY, Li MQ, Wang LH, Teng WC. Effects of three plant exogenous hormones on the biomass, chlorophyll fluorescence parameters, and photosynthetic characteristics of *Tabebuia chrysanthra* seedlings[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(5): 745~754

三种外源植物激素对黄花风铃木幼苗生物量、叶绿素荧光参数及光合特性的影响

黄杰¹, 陈宗福², 尹丽英², 李曼清¹, 王凌晖^{1*}, 滕维超¹

(1. 广西大学林学院, 南宁 530000; 2. 广西国有钦廉林场, 广西钦州 535000)

摘要: 以黄花风铃木(*Tabebuia chrysanthra* (Jacq.) Nichols)幼苗为材料, 采用L₁₆(4⁵)正交实验方法, 测定生根粉(GGR)、3-吲哚乙酸(IAA)、多效唑(PP₃₃₃)3种外源植物激素不同组合处理下黄花风铃木幼苗的生物量、叶绿素含量、叶绿素荧光参数以及光合特性, 研究3种外源植物激素不同组合对黄花风铃木幼苗生长和光合作用的影响, 筛选出适宜黄花风铃木幼苗生长的最佳浓度组合。结果显示: 11号处理(GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L)幼苗鲜重、干重均大于其他组合处理。3种外源植物激素中, GGR对幼苗鲜重、幼苗干重增长起主导作用, IAA和PP₃₃₃的作用不明显。11号处理下的幼苗净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、叶绿素含量、叶绿素荧光参数均大于其他处理, 胞间二氧化碳浓度值最低。分析得出IAA对黄花风铃木幼苗的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、光合系统潜在活性、最大光能转换效率和叶绿素含量起主导作用, GGR和PP₃₃₃的作用不明显。综合分析各指标得出, 适宜黄花风铃木幼苗生长的最佳外源激素浓度组合为11号处理, 此浓度下黄花风铃木幼苗综合质量最佳。

关键词: 黄花风铃木; 外源植物激素; 叶绿素荧光参数; 光合特性; 浓度组合

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2018)05-0745-10

Effects of three plant exogenous hormones on the biomass, chlorophyll fluorescence parameters, and photosynthetic characteristics of *Tabebuia chrysanthra* seedlings

Huang Jie¹, Chen Zong-Fu², Yin Li-Ying², Li Man-Qing¹, Wang Ling-Hui^{1*}, Teng Wei-Chao¹

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530000, China; 2. State-Owned Qinlian Forest Farm in Guangxi, Qinzhou, Guangxi 535000, China)

Abstract: We applied a L₁₆(4⁵) orthogonal experimental design to determine and compare the biomass, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, and photosynthetic characteristics of *Tabebuia chrysanthra* (Jacq.) Nichols seedlings under different combinations of rooting powder (GGR), indole acetic acid (IAA), and paclobutrazol (PP₃₃₃). The effects of the different combinations of plant exogenous hormones (GGR, IAA, and PP₃₃₃) on the growth and photosynthesis of *T. chrysanthra* seedlings were used to derive the optimal

收稿日期: 2018-04-09, 退修日期: 2018-05-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31360174); 广西林业科技项目(桂林科字[2012]第25号); 广西国有钦廉林场星岛湖树种调整和改造模式研究(钦廉科字2017-1号)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation Project (31360174), Guangxi Forestry Science and Technology Project (Guilin[2012] No.25), and Research on Tree Species Adjustment and Transformation Mode of Xingdao Lake, State-Owned Qinlian Forest Farm in Guangxi (Qinlian No.2017-1).

作者简介: 黄杰(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为园林植物生理(E-mail: 1075866379@qq.com)

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: wanglinghui97@163.com)。

concentration combination. Results showed that fresh weight and dry weight were highest under Treatment 11 (GGR 400 mg/L, IAA 400 mg/L, PP₃₃₃ 400 mg/L) compared with the other treatments. Among the three plant exogenous hormones, GGR played a leading role in the increase in fresh and dry weights, whereas IAA and PP₃₃₃ did not have a significant effect. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, chlorophyll content, and chlorophyll fluorescence parameters of seedlings were also highest under Treatment 11, whereas intracellular carbon dioxide concentration was lowest. Results also showed that IAA played a leading role in the net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate, potential activity of photosynthesis system, maximum light energy conversion efficiency, and chlorophyll content of *T. chrysanthra* seedlings, whereas the effects of GGR and PP₃₃₃ were not obvious. Comprehensive analysis further showed that the appropriate concentration combination of different exogenous hormones was that of Treatment 11, under which the quality of *T. chrysanthra* seedlings was optimal.

Key words: *Tabebuia chrysanthra*; Plant exogenous hormones; Chlorophyll fluorescence parameters; Photosynthetic characteristics; Concentration combination

黄花风铃木(*Tabebuia chrysanthra* (Jacq.)

Nichols)是我国引进的重要园林景观植物^[1]，具有树形优美、花色艳丽、生长快速等特点，一年四季表现出不同的景色。目前对黄花风铃木的研究主要集中在种子萌发、栽培管理和繁殖技术等方面^[2-5]，有关外源植物激素对黄花风铃木生长的影响还未见研究报道。

外源植物激素是具有和内源植物激素相似生理功能的人工小分子化合物。按照其作用效果可以分为生长促进剂、抑制剂和延缓剂^[6]，外源植物激素在植物种子萌发、开花、果实成熟、根系生长等方面起到重要的调控作用，在植物抗逆性方面也有良好的调控作用^[7-10]。唐中杰等^[11]研究外源植物激素处理棉花的结果表明，适宜浓度的外源激素能促进棉花根系的生长，增加棉铃的数量和质量，具有增产作用。宁倩等^[12]研究外源植物激素对低氮环境下水稻养分吸收的影响表明，外源激素能够提高光合效率，促进水稻对养分的吸收。刘娟等^[13]研究外源植物激素对小麦盐胁迫的影响表明，外源植物激素一定程度上可以减轻盐胁迫对小麦幼苗的伤害，提高小麦幼苗的抗盐能力。以上研究表明，外源植物激素对植物器官生长发育、养分吸收、光合作用以及抗性生理都有一定的影响，但有关多种外源植物激素之间交互作用的研究极少。因此，我们采用正交实验法研究不同外源植物激素交互作用对黄花风铃木的光合生理及生长发育的影响，以期为外源植物激素在黄花风铃木生长上的应用提供更

多科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验地点概况

实验地点位于广西大学林学院苗圃教学实验基地(南宁市，北纬22°85'、东经108°29')。该地区属于亚热带季风气候，霜少无雪，气候温和，年均气温21.6℃左右，年均降水量达1304.2 mm，平均相对湿度79%，适宜黄花风铃木幼苗生长。本实验在教学实验基地大棚内进行，大棚通风、采光条件良好，生长条件与自然条件基本一致。

1.2 实验材料

黄花风铃木幼苗由广西壮族自治区林业科学院提供，为株高5 cm、直径7 mm的营养苗胚。供试外源植物激素为生根粉(GGR)(双吉尔公司生产)、3-吲哚乙酸(IAA)(天津市科密欧化学试剂有限公司生产)和多效唑(PP₃₃₃)(四川国光农化股份有限公司生产)。于2013年12月将无病虫害、生长良好、大小一致的黄花风铃木幼苗定植于塑料花盆(盆高30 cm，口径24 cm)，每盆1株，以腐殖土与沙土按3:1(干重)的比例配制栽培基质，定植后定期统一水肥管理。2014年5月进行预实验，确定各外源植物激素适宜的浓度梯度，正式实验于2014年6月至9月进行。

1.3 实验设计

采用3因素4水平正交实验设计，共设16个生长调节剂配方(表1)，实验期间每隔15 d喷施

表 1 3 种外源植物激素浓度组合 $L_{16}(4^5)$ 正交实验设计
Table 1 Different combinations of three plant exogenous hormones under $L_{16}(4^5)$ orthogonal experiment design

编号 No.	生根粉 GGR (mg/L)	3-吲哚乙酸 IAA (mg/L)	多效唑 PP_{333} (mg/L)
1	0	0	400
2	200	0	0
3	400	0	800
4	800	0	200
5	0	200	200
6	200	200	800
7	400	200	0
8	800	200	400
9	0	400	800
10	200	400	200
11	400	400	400
12	800	400	0
13	0	800	0
14	200	800	400
15	400	800	200
16	800	800	800

药剂 1 次,每次喷施直到叶片正反两面滴水为止,于傍晚进行喷施,每处理设 10 个重复。以清水为对照(CK)。

1.4 生理指标测定

1.4.1 生物量测定

采用称重方法测定生物量。待所有测定实验结束后,每组处理选择 3 株长势基本一致的植株,用自来水将植株叶片和根系洗净晾干,用电子天平称重,分别装入牛皮纸袋,置于烘箱于 100℃ 杀青 30 min,然后在 80℃ 下烘干至恒重,称取干重。

1.4.2 光合特性参数测定

于 2014 年 9 月中旬的晴天上午 9:00–11:00, 使用 LI-6400XT 便携式光合作用测定仪, 测定从顶芽往下数第 3 至第 5 片功能叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)及蒸腾速率(T_r)。每组随机选取 3 株长势中等且健康的植株,每株取 3 片叶子进行测定,每叶片重复测定 3 次。测定时设置自然光叶室、大气 CO_2 浓度 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 、相对湿度 60%、叶室温度 30℃。

1.4.3 叶绿素荧光测定

于 2014 年 10 月中旬凌晨 2:00–4:00, 每组

处理随机选择健康、长势良好的 3 片功能叶, 使用 PAM-2500 荧光仪, 于每片功能叶偏离叶脉的 3 个点, 测定初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)及最大光能转换效率(F_v/F_m), 测定结果取平均值。

1.4.4 叶绿素含量的测定

于 2014 年 9 月晴朗天气, 每个处理选取 3 株, 剪取当年生叶片用锡纸包好后放入冰盒带回实验室, 称取 2 g 样品, 放入研钵中, 加入少量石英砂和碳酸钙粉及 3 mL 95% 乙醇研磨成匀浆, 再加入乙醇 10 mL, 继续研磨至组织变白, 取匀浆过滤, 将滤液移至 100 mL 棕色容量瓶, 再将滤纸上的叶绿体色素用乙醇全部洗入容量瓶中, 最后用乙醇定容至 100 mL。取叶绿体色素提取液, 使用 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计在 649 nm 和 665 nm 波长下测定吸光度, 计算各处理的叶绿素含量。

1.5 数据处理

通过 Excel 整理和计算实验数据, 采用 SAS Studio 3.4 进行方差分析, SPSS 19.0 进行相关性分析。

2 结果与分析

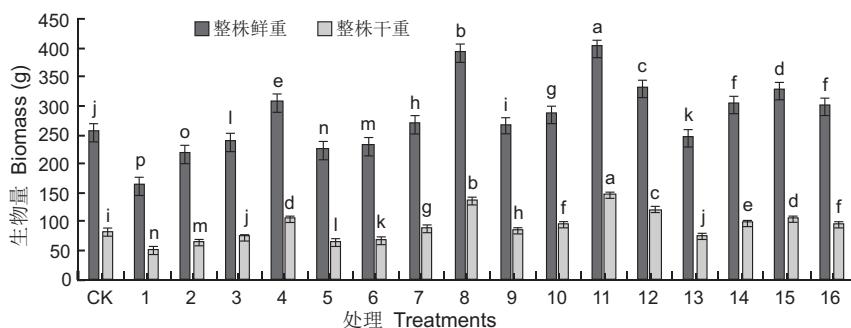
2.1 不同外源激素组合对黃花风铃木幼苗生物量的影响

植物的鲜重和干重在一定程度上反映其生物产量和有机物的积累。在一定条件下光合作用越强, 其产生的有机物越多。本实验 3 种不同外源植物激素 16 种组合处理对黃花风铃木的生物量变化产生了不同的影响(图 1), 各处理间幼苗的鲜重及干重差异较大, 其中 11 号处理(GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、 PP_{333} 400 mg/L)的整株鲜重及干重最重, 高于其他处理组合, 表明该处理浓度对黃花风铃木幼苗的生长效果最好。

对黃花风铃木幼苗鲜重和干重进行方差分析,结果显示(表 2), GGR 对幼苗整株鲜重和干重的影响分别达显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)水平; IAA 对幼苗整株干重的影响显著。从幼苗鲜重来看, GGR 起主导作用, IAA 和 PP_{333} 作用不明显; 从幼苗干重来看, GGR 起主要作用, IAA 起次要作用, PP_{333} 作用不明显。

2.2 不同外源激素组合对叶绿素荧光参数的影响

植物光合作用可以通过叶绿素荧光参数来反映。



不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

Different lower-case letters mean significant differences among treatments at 0.05, same below.

图 1 不同外源激素处理下黄花风铃木幼苗的生物量

Fig. 1 Biomass of *Tabebuia chrysantha* seedlings under different exogenous hormone treatment

表 2 黄花风铃木幼苗鲜重和干重的方差分析

Table 2 ANOVA of fresh and dry weight of *T. chrysantha* seedlings

生物量 Biomass	外源植物激素 Plant exogenous hormone	SS	DF	MS	F	Pr > F
鲜重 Fresh weight	GGR	28617.246	3	9539.082	7.78	0.0172
	IAA	17015.683	3	5671.894	4.62	0.0529
	PP ₃₃₃	7339.361	3	2446.453	1.99	0.2146
	e	7359.534	6	1266.589		
	Total	60331.822	15			
干重 Dry weight	GGR	4961.246	3	1653.861	11.41	0.0068
	IAA	2734.701	3	911.567	6.29	0.0278
	PP ₃₃₃	1642.757	3	547.586	3.78	0.0779
	e	869.391	6	144.899		
	Total	10208.431	15			

注: SAS 方差分析中, $Pr > F$ 表示 P 值; SS: 平方和; DF: 自由度; MS: 均方; e: 误差; GGR: 生根粉; IAA: 3-吲哚乙酸; PP₃₃₃: 多效唑。下同。

Notes: ANOVA of SAS, $Pr > F$ represents P value, SS: Sum of square; DF: Degrees of freedom; MS: Mean square; e: Error; GGR: Rooting powder; IAA: Indole acetic acid; PP₃₃₃: Paclobutrazol. Same below.

初始荧光(F_0)反映的是光系统(PS II)反应中心完全开放的荧光产量, 最大荧光(F_m)是PS II反应中心完全封闭的荧光产量, 可变荧光(F_v)反映PS II原初电子受体Q_A的还原情况。 F_v/F_m 值、 F_v/F_0 值分别代表光合系统的最大光能转换效率和潜在活性。

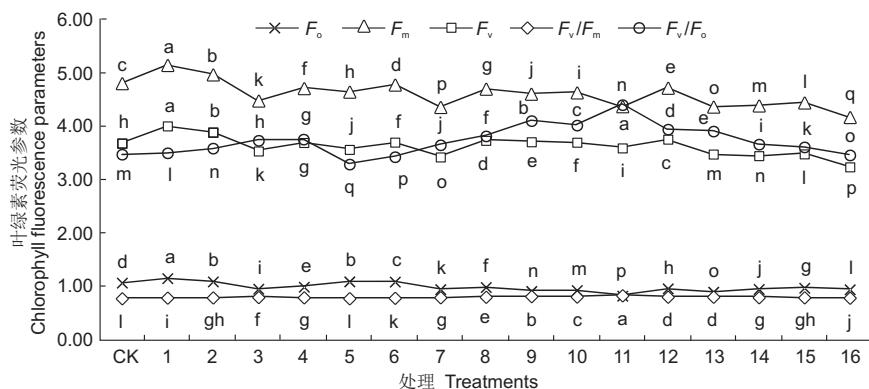
不同外源激素组合对黄花风铃木幼苗光合系统的最大光能转换效率(F_v/F_m)和潜在活性(F_v/F_0)起到不同的影响(图2), 其中9、10、11、12号处理的影响明显高于CK处理, F_v/F_m 值达到0.806、0.789、0.821、0.796, F_v/F_0 值分别为4.105、4.021、4.405、3.945。11号处理 F_v/F_m 值、 F_v/F_0 值最高, 表明3种外源植物激素组合为GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L时对叶绿素荧光参数的影响最佳, 在此浓度组合下

黄花风铃木幼苗的光合作用最强。

对黄花风铃木幼苗叶绿素荧光参数进行方差分析, 结果显示(表3), 3种外源激素中, IAA对幼苗PS II的最大光能转换效率及光能系统潜在活性的影响显著, GGR和PP₃₃₃未达到显著水平, 表明IAA是影响黄花风铃木幼苗叶绿素荧光参数的主要因素, 而GGR和PP₃₃₃的作用不明显。

2.3 不同外源激素组合对黄花风铃木幼叶绿素含量的影响

实验结果表明, 除5号处理外, 其他处理的叶绿素a含量均高于CK处理, 而叶绿素b含量相反, 除5号处理外, 其他处理叶绿素b含量均低于CK处理(表4)。叶绿素总含量除4、5号处理外, 其他处理均高于CK处理, 其中11号处理叶绿素总含量最高。



F_0 : 初始荧光; F_m : 最大荧光; F_v : 可变荧光; F_v/F_m : 光系统最大光能转换效率; F_v/F_0 : 光系统潜在活性。下同。

F_0 : Initial fluorescence; F_m : Maximum fluorescence; F_v : Variable fluorescence; F_v/F_m : Maximum light energy transformation efficiency of photosystem; F_v/F_0 : Potential activity of photosystem. Same below.

图 2 不同外源激素组合处理下黄花风铃木幼苗的叶绿素荧光参数
Fig. 2 Chlorophyll fluorescence parameters of *T. chrysanthra* seedlings under different exogenous hormone treatment

表 3 黄花风铃木幼苗叶绿素荧光参数的方差分析

Table 3 ANOVA of chlorophyll fluorescence parameters of *T. chrysanthra* seedlings

叶绿素荧光参数 Chlorophyll fluorescence parameter	外源植物激素 Plant exogenous hormone	SS	DF	MS	F	Pr > F
F_v/F_m	GRG	0.000216	3	0.00000721	0.75	0.559
	IAA	0.00157	3	0.000523	5.47	0.038
	PP ₃₃₃	0.000291	3	0.0000971	1.01	0.449
	e	0.000574	6	0.0000957		
	Total	0.00265	15			
F_v/F_0	GRG	0.0719	3	0.024	0.51	0.688
	IAA	0.787	3	0.262	5.61	0.036
	PP ₃₃₃	0.084	3	0.026	0.60	0.641
	e	0.281	6	0.047		
	Total	1.224	15			

表 4 不同组合外源激素处理下黄花风铃木幼苗叶绿素含量

Table 4 Chlorophyll content of *T. chrysanthra* seedlings under different exogenous hormone treatment

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	叶绿素总含量 Total chlorophyll content
CK	5.62 ± 0.27d	4.76 ± 0.02b	10.38 ± 0.26d
1	5.77 ± 0.07cd	4.72 ± 0.01bc	10.49 ± 0.07cd
2	5.91 ± 0.10cd	4.69 ± 0.01c	10.60 ± 0.09cd
3	6.02 ± 0.21c	4.69 ± 0.02c	10.71 ± 0.19cd
4	5.87 ± 0.05cd	4.45 ± 0.01c	10.32 ± 0.10d
5	4.91 ± 0.06e	4.81 ± 0.01a	9.72 ± 0.06e
6	5.74 ± 0.13cd	4.69 ± 0.01c	10.43 ± 0.12d
7	6.00 ± 0.02cd	4.68 ± 0.01cd	10.68 ± 0.01cd
8	6.40 ± 0.03b	4.65 ± 0.02cd	11.05 ± 0.03b
9	6.87 ± 0.06a	4.56 ± 0.01e	11.43 ± 0.05a
10	6.29 ± 0.02bc	4.67 ± 0.03cd	10.96 ± 0.04bc
11	7.01 ± 0.02a	4.55 ± 0.01e	11.56 ± 0.01a
12	6.80 ± 0.04a	4.59 ± 0.01e	11.39 ± 0.03a
13	6.76 ± 0.03a	4.62 ± 0.02de	11.38 ± 0.04a
14	6.11 ± 0.16bc	4.64 ± 0.01d	10.75 ± 0.15c
15	6.38 ± 0.08b	4.62 ± 0.01de	11.00 ± 0.07bc
16	5.92 ± 0.07cd	4.67 ± 0.00cd	10.59 ± 0.07cd

注: 同列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$) , 下同。

Note: Different lower-case letters after same column data mean significant differences among treatments at 0.05, same below.

对黄花风铃木叶绿素含量进行方差分析,结果显示(表5),IAA对叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量的影响显著,而GGR和PP₃₃₃的影响未达到显著水平,说明IAA对幼苗叶绿素含量的影响起主导作用。

2.4 不同外源激素组合对黄花风铃木幼苗光合特性的影响

2.4.1 净光合速率(P_n)

不同外源植物激素组合对黄花风铃木幼苗 P_n

的影响存在差异(表6),其中11号处理 P_n 值达到15.16 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,明显高于其他处理组合,比对照增加了62.1%,11号处理对幼苗 P_n 的促进作用达到显著水平($P < 0.05$),说明3种外源植物激素组合为GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L时对黄花风铃木幼苗 P_n 具有良好的促进作用。

三种外源植物激素(GGR、IAA、PP₃₃₃)对黄花风铃木幼苗 P_n 影响的方差分析结果显示(表7),

表5 黄花风铃木叶绿素含量方差分析
Table 5 ANOVA of chlorophyll content of *T. chrysanthra* seedlings

叶绿素含量 Chlorophyll content	外源植物激素 Plant exogenous hormone	SS	DF	MS	F	Pr > F
Chlorophyll a	GGR	0.287	3	0.096	0.58	0.6515
	IAA	2.392	3	0.794	4.87	0.0498
	PP ₃₃₃	0.635	3	0.212	1.28	0.3647
	e	0.997	6	0.166		
	Total	4.311	15			
Chlorophyll b	GGR	0.004	3	0.001	0.69	0.5927
	IAA	0.034	3	0.011	5.41	0.0386
	PP ₃₃₃	0.007	3	0.002	1.17	0.3947
	e	0.013	6	0.002		
	Total	0.058	15			
Total chlorophyll	GGR	0.201	3	0.067	0.54	0.6741
	IAA	1.943	3	0.648	5.19	0.0418
	PP ₃₃₃	0.650	3	0.217	1.74	0.2587
	e	0.748	6	0.125		
	Total	3.542	15			

表6 黄花风铃木幼苗的光合特性
Table 6 Photosynthetic characteristics of *T. chrysanthra* seedlings

处理 Treatment	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol/mol}$)
CK	9.35 ± 1.27bc	1.51 ± 0.22b	0.026 ± 0.006b	257.49 ± 20.74ab
1	10.98 ± 1.44ab	1.59 ± 0.21b	0.030 ± 0.005ab	256.38 ± 20.81ab
2	10.40 ± 2.76b	1.55 ± 0.48b	0.029 ± 0.010ab	313.25 ± 30.12a
3	11.09 ± 1.48ab	1.70 ± 0.13b	0.039 ± 0.005ab	228.37 ± 7.12ab
4	9.43 ± 0.74bc	1.32 ± 0.21b	0.024 ± 0.005b	299.66 ± 54.26ab
5	8.40 ± 1.39bc	1.29 ± 0.25b	0.021 ± 0.004b	300.72 ± 53.87ab
6	10.85 ± 2.40ab	1.76 ± 0.57b	0.030 ± 0.010ab	283.16 ± 41.29ab
7	9.81 ± 1.16b	1.74 ± 0.32b	0.028 ± 0.006b	289.55 ± 35.12ab
8	11.09 ± 0.92ab	1.47 ± 0.13b	0.026 ± 0.005b	253.52 ± 11.38ab
9	14.26 ± 0.89a	1.95 ± 0.07b	0.043 ± 0.005ab	273.78 ± 7.89ab
10	11.44 ± 0.68ab	1.98 ± 0.10b	0.027 ± 0.004b	224.70 ± 9.60ab
11	15.16 ± 1.29a	2.84 ± 0.49a	0.051 ± 0.008a	205.94 ± 1.86b
12	13.96 ± 0.94ab	2.61 ± 1.12ab	0.048 ± 0.022ab	251.65 ± 46.96ab
13	10.97 ± 0.93ab	1.42 ± 0.24b	0.029 ± 0.003b	324.48 ± 36.26a
14	10.69 ± 0.69ab	1.99 ± 0.15ab	0.031 ± 0.003ab	247.86 ± 29.76ab
15	9.25 ± 0.61bc	1.99 ± 0.32b	0.021 ± 0.005b	284.23 ± 45.14ab
16	5.78 ± 0.85c	0.97 ± 0.30b	0.012 ± 0.005b	297.22 ± 52.92ab

Note: P_n , Net photosynthetic rate; T_r , Transpiration rate; G_s , Stomatal conductance; C_i , Intercellular CO_2 concentration. Same below.

3种外源激素中, IAA 对幼苗 P_n 的影响达到显著水平, GGR 和 PP₃₃₃ 均未达到显著水平。表明 IAA 是影响黃花风铃木幼苗 P_n 的主要因素, 而 GGR、PP₃₃₃ 的作用不明显。

2.4.2 蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间二氧化碳浓度(C_i)

气孔是植物细胞与外界环境连接的通道, 也是植物吸收 CO₂ 和叶片蒸腾作用水分散失的主要通道, 气孔的开放程度关系到植物光合作用所需的碳获取, 另外, 水分散失也与植物的蒸腾作用有关。在不同的处理下, 黃花风铃木幼苗需维持一定光合作用的碳获取, 但也要避免过度的蒸腾作用造成水分散失, 这就需要幼苗通过对气孔导度的调节来达到平衡。本实验中不同外源植物激素组合对黃花风铃木幼苗 T_r 、 G_s 和 C_i 的影响不同(表6), 其中 11号处理幼苗的 G_s 和 T_r 值最大, 明显高于对照和其他处理, 表明 11号处理幼苗的气孔开放程度最大, 从而导致幼苗的蒸腾速率最大。胞间二氧化碳浓度能间接反映光合速率的高低,

11号处理幼苗的 C_i 值明显低于其他处理, 表明在相同条件下 11号处理幼苗 G_s 最大, 从而导致 T_r 最大, 气体交换能力最强, 11号处理 C_i 最低说明其光合作用消耗的 CO₂ 最多, P_n 最强。研究结果表明不同外源植物激素组合对黃花风铃木幼苗的光合生理产生了不同影响, 当激素组合为 GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L 时对幼苗的光合生理最有利。

三种外源植物激素(GGR、IAA、PP₃₃₃)对黃花风铃木幼苗 T_r 、 G_s 和 C_i 影响的方差分析结果显示(表8), IAA 对幼苗 T_r 和 G_s 的作用显著, GGR 和 PP₃₃₃ 的作用未达到显著水平。说明 IAA 是影响幼苗 G_s 和 T_r 的主要因素, 而 GGR 和 PP₃₃₃ 的作用不明显; 3种外源植物激素直接作用于叶片对幼苗 C_i 的影响不明显。

2.5 不同光合参数的相关性分析

不同外源植物激素组合对黃花风铃木幼苗光合作用影响的相关性分析结果显示(表9), 光系统潜在活性(F_v/F_o)与光系统最大光能转换效率(F_v/F_m)

表 7 黃花风铃木幼苗净光合速率(P_n)的方差分析
Table 7 ANOVA of net photosynthetic rate (P_n) of *T. chrysanthra* seedlings

外源植物激素 Plant exogenous hormone	SS	DF	MS	F	Pr > F
GGR	3.7502	3	1.2501	0.51	0.6926
IAA	47.0590	3	15.6863	6.34	0.0273
PP ₃₃₃	12.3363	3	4.1121	1.66	0.2726
e	14.8382	6	2.4730		
Total	77.9837	15			

表 8 黃花风铃木幼苗 T_r 、 G_s 、 C_i 的方差分析
Table 8 ANOVA of T_r , G_s , and C_i of *T. chrysanthra* seedlings

光合参数 Photosynthetic parameter	外源植物激素 Plant exogenous hormone	SS	DF	MS	F	Pr > F
T_r	GGR	0.4404	3	0.1468	2.00	0.2150
	IAA	1.9889	3	0.6630	9.05	0.0121
	PP ₃₃₃	0.4954	3	0.1651	2.25	0.1825
	e	0.4395	6	0.0733		
	Total	3.3642	15			
G_s	GGR	0.00011448	3	0.00003816	0.79	0.5428
	IAA	0.00086082	3	0.00028694	5.93	0.0316
	PP ₃₃₃	0.00032306	3	0.00010769	2.23	0.1859
	e	0.00029034	6	0.00004839		
	Total	0.00158870	15			
C_i	GGR	2851.3464	3	950.4488	2.16	0.1934
	IAA	5816.6125	3	1938.8708	4.41	0.0580
	PP ₃₃₃	6032.3872	3	2010.7957	4.58	0.0540
	e	2635.0468	6	439.1745		
	Total	17335.3929	15			

表9 黄花风铃木幼苗各光合指标的相关性分析
Table 9 Correlation analysis between photosynthesis indexes of *T. chrysantha* seedlings

指标 Index	F_o	F_m	F_v	F_v/F_m	F_v/F_o	P_n	T_r	G_s	C_i
F_o	1								
F_m	0.771 **	1							
F_v	0.543 *	0.952 **	1						
F_v/F_m	-0.783 **	-0.732 **	0.720 **	1					
F_v/F_o	-0.783 **	-0.216	0.920 **	0.990 **	1				
P_n	-0.374	0.202	0.462	0.809 **	0.780 **	1			
T_r	-0.441	0.001	0.228	0.719 **	0.715 **	0.869 **	1		
G_s	-0.370	0.120	0.354	0.735 **	0.719 **	0.944 **	0.892 **	1	
C_i	0.355	0.026	-0.151	-0.563 *	-0.550 *	-0.577 *	-0.699 **	-0.591 *	1

注: * 表示显著相关($P < 0.05$) ; ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

Note: * represents significant correlation at 0.05; ** represents highly significant correlation at 0.01.

呈极显著正相关($P < 0.01$)；与净光合速率(P_n)呈极显著正相关的指标有 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 T_r 和 G_s ； C_i 与 P_n 呈显著负相关($P < 0.05$)。即不同外源植物激素组合可以通过调节以上指标来调控黄花风铃木幼苗的生长发育。综合分析实验结果得出，11号处理即GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L时黄花风铃木幼苗生长最好，为3种外源激素的最佳浓度组合。

3 讨论

外源植物激素可以改变植物体内各激素平衡，从而引发植物体代谢生理及光合生理发生改变，不同的外源激素对植物的调控作用也有差异。生物量是黄花风铃木幼苗对外源植物激素作用的综合体现，也是对环境综合适应的结果^[14-16]，它是外源植物激素最优组合的直接指标。因此，生物量的积累可以作为判定外源植物激素最佳浓度组合的标准。本实验通过3种外源植物激素对黄花风铃木幼苗生物量影响的分析结果表明，GGR对幼苗生物量影响起主导作用，说明其对幼苗内源激素起到良好的调控作用，促进某些代谢相关酶活性，进而影响植物的生长、有机物的合成和代谢，促进黄花风铃木幼苗生物量的积累。通过对11号处理(GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L)及16号处理(GGR 800 mg/L、IAA 800 mg/L、PP₃₃₃ 800 mg/L)实验结果进行对比，发现16号处理生物量明显下降，这表明当外源激素浓度超过一定浓度值时对黄花风铃木幼苗生物量的促进作用开始降低，这与李甜江等^[17]研究克隆植物中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis*)生长对外源植物激素响应的结果一致。本实验中，11号

处理幼苗的生物量明显高于其他处理，说明11号处理外源激素浓度组合最适合黄花风铃木幼苗生物量的积累。

叶绿素是植物光合作用过程中的重要色素，叶绿素荧光参数能够直接反映植物的光合速率^[18]。 F_o 是PSⅡ反应中心处于完全开放时的荧光产量， F_o 数值增大表明PSⅡ反应中心受到阻碍或发生可逆失活^[19]。王明^[20]研究外源植物激素对提高番茄幼苗弱光逆境适应性的结果表明，外源激素能够抑制 F_o 值上升，对PSⅡ反应中心起保护作用，能提高幼苗对光逆境的适应能力。本实验中11号处理黄花风铃木幼苗 F_o 值明显低于其他处理，表明此外源激素浓度组合能有效提高幼苗的光强适应能力，提高幼苗的抗逆性。 F_v/F_m 揭示了植物体对生境光强密度长期适应的机制，非胁迫条件下此参数的变化极小，几乎不受物种和生长条件的影响^[21]。本研究对3种外源植物激素的方差分析结果显示，IAA能显著提高黄花风铃木幼苗的 F_v/F_m 和 F_v/F_o ，表明IAA能改变幼苗对生境光强密度长期适应机制，从而降低幼苗光合作用光抑制的敏感性，增强对光合机构的保护作用，这与胡留杰等^[22]研究外源植物激素对茶新梢叶绿素荧光参数日变化影响的结果一致。相关性分析显示， F_v/F_m 、 F_v/F_o 与净光合速率呈极显著正相关，表明 F_v/F_o 及 F_v/F_m 越大，净光合速率越大，植物生长发育和有机物积累就越好。本研究中，11号处理黄花风铃木幼苗叶绿素含量最高，叶绿素荧光参数的综合质量最好，表明此外源激素浓度组合是黄花风铃木幼苗叶绿素生理功能的最适浓度，叶绿素活性最强，光合性能最佳。

净光合速率能反映植物光合生物学特性,是衡量光合作用的重要指标;气孔导度是气孔开放程度的指标,其大小影响植物与外界气体的交换,气孔导度能对光合作用起到调控作用^[23~25];蒸腾作用是植物吸收和运输水分的主要途径,能够直接影响光合作用所需的水分;胞间二氧化碳浓度是衡量植物光合作用的重要指标,能够反映植物对CO₂的利用效率。相关性分析显示,净光合速率与气孔导度、蒸腾速率呈极显著正相关;气孔导度与蒸腾速率呈极显著正相关;净光合速率、气孔导度及蒸腾速率与胞间二氧化碳浓度呈极显著负相关。说明气孔导度越大则植物蒸腾速率越大,胞间二氧化碳浓度越低则植物净光合速率越大,光合能力越强^[26]。本研究对3种外源植物激素对光合特性影响的方差分析结果显示,IAA对黄花风铃木幼苗光合特性影响显著,GGR和PP₃₃₃的作用不明显,表明IAA能够提高幼苗叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,这与曲天明^[27]研究DCPTA对寒地玉米叶片光合特性影响的结果一致。本实验中11号处理下的黄花风铃木幼苗净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均明显高于其他处理组合,胞间二氧化碳浓度低于其他组合,说明3种外源植物激素组合为GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L时黄花风铃木幼苗光合特性指标均达到最佳。

通过GGR、IAA、PP₃₃₃不同外源植物激素组合对黄花风铃木幼苗生物量、叶绿素含量、叶绿素荧光以及光合特性的影响进行综合分析,结果表明,GGR能够直接影响幼苗的生物量,IAA能够改变幼苗内源激素的平衡从而影响叶绿素含量、叶绿素荧光参数和光合特性。3种外源植物激素GGR 400 mg/L、IAA 400 mg/L、PP₃₃₃ 400 mg/L为黄花风铃木幼苗生长的最佳组合。不同外源植物激素对植物的作用效果存在差异,同时施用多种外源激素可以激发生长调节剂之间的交互作用,对植物影响更多样、效果更显著。按照此3种外源植物激素的最佳浓度组合施用于植物叶片,能充分发挥各外源激素的作用,大大降低外源激素在林业、园林和农业生产上的使用成本,提高经营管理效率。

参考文献:

- [1] 王熙. 园林树种黄花风铃木[J]. 广东林业科技, 2007, 23(2): 115~116.
Wang X. Botanical garden tree species of *Tabebuia chrysanth*[J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2007, 23(2): 115~116.
- [2] 何英姿. 氮磷钾平衡施肥对黄花风铃木幼苗生长生理的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [3] 林文胜. 黄花风铃木的栽培技术研究及绿化应用[J]. 中国园艺文摘, 2011, 27(12): 117~118.
Lin WS. Cultivation techniques and application of *Tabebuia chrysanth* [J]. *Chinese Horticultural Digest*, 2011, 27(12): 117~118.
- [4] 钟海智, 林耿, 陈志刚, 邹永灵, 彭海新. 黄花风铃木种苗培育技术[J]. 广东林业科技, 2015, 31(2): 146~148.
Zhong HZ, Lin G, Chen ZG, Zou YL, Peng HX. Cultivation technology of *Tabebuia chrysanth* seedlings [J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2015, 31(2): 146~148.
- [5] 尚秀华, 高丽琼, 张沛健, 林彦, 彭彦. 3种风铃木扦插繁殖技术研究[J]. 桉树科技, 2016, 33(1): 38~42.
Sang XH, Gao LQ, Zhang PJ, Lin Y, Peng Y. Three kinds of *Tabebuia chrysanth* cuttings [J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2016, 33(1): 38~42.
- [6] 张锋, 潘康标, 田子华. 植物生长调节剂研究进展及应用对策[J]. 现代农业科技, 2012(1): 193~195.
Zhang F, Pan KB, Tian ZH. Research progress and application countermeasures of plant growth regulators [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2012(1): 193~195.
- [7] 陶奇波, 白梦杰, 韩云华, 冯葆昌, 王彦荣. 植物生长调节剂在牧草种子生产中的应用[J]. 草业科学, 2017, 34(6): 1238~1246.
Tao QB, Bai MJ, Han YH, Feng BC, Wang YR. Use of plant growth regulators in forage seed production [J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(6): 1238~1246.
- [8] 宋吉轩. 干旱胁迫下植物生长调节剂对羊草生长及生理特性的影响与转录组分析[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [9] 位勤. 植物生长调节剂对油松种子萌发的影响[J]. 防护林科技, 2018(2): 33~34.
Wei J. Influence of plant growth regulator on seed germination of *Pinus tabulaeformis* [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2018(2): 33~34.
- [10] 樊海潮, 顾万荣, 剑菊萍, 王悦力, 孟瑶, 张立国, 李晶, 魏湜. 植物生长调节剂增强玉米抗倒伏能力的机制[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2): 253~262.
Fan HC, Gu WR, Wei JP, Wang YL, Meng Y, Zhang LG, Li J, Wei S. Mechanism of lodging resistance of maize improved by plant growth regulator [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 33(2): 253~262.
- [11] 唐中杰, 房卫平, 孙玉堂. 不同植物生长调节剂在棉花上的应用效果研究[J]. 中国农学通报, 2006(2): 179~181.
Tang ZJ, Fang WP, Sun YT. Studies on the effect of different kinds of plant growth regulator on cotton [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006(2): 179~181.

- nese Agricultural Science Bulletin, 2006(2): 179–181.
- [12] 宁倩, 吴金水, 李宝珍, 吴蔓莉. 水稻苗期生长特性对不同浓度 IAA 的响应 [J]. 农业现代化研究, 2013, 34(2): 235–238.
Ning Q, Wu JS, Li BZ, Wu ML. Response of growth characteristics to different IAA concentrations in rice seedling [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2013, 34(2): 235–238.
- [13] 刘娟, 马小乐, 尚勋武, 王化俊. 外源 IAA 对小麦‘西旱 2 号’幼苗水分胁迫和 NaCl 胁迫的缓解响应 [J]. 甘肃农业大学学报, 2009, 44(2): 47–51.
Liu J, Ma XL, Sang XW, Wang HJ. Regulation of exogenous auxin IAA on drought and salt stress during seedling stage of spring wheat (cv. Xihan No. 2) [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2009, 44(2): 47–51.
- [14] Vicente O, Boscaiu M, Naranjo MA, Estrelles E, Bellés JM, Soriano P. Responses to salt stress in the halophyte *Plantago crassifolia* (Plantaginaceae) [J]. *J Arid Environ*, 2004, 58(4): 463–481.
- [15] 张晓晓, 殷小琳, 李红丽, 苏丹, 贾淑友, 董智. NaCl 胁迫对不同白榆品种生物量及光合作用的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7258–7265.
Zhang XX, Yin XL, Li HL, Su D, Jia SY, Dong Z. Effect of salt stress on the biomass and photosynthetic characteristics of *Ulmus pumila* L. strains [J]. *Ecological Journal*, 2017, 37(21): 7258–7265.
- [16] 宗宁, 段呈, 耿守保, 柴曦, 石培礼, 何永涛. 增温施氮对高寒草甸生产力及生物量分配的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 59–67.
Zong N, Duan C, Geng SB, Chai X, Shi PL, He YT. Effects of warming and nitrogen addition on community production and biomass allocation in an alpine meadow [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 59–67.
- [17] 李甜江, 李根前, 贺斌, 徐德兵. 克隆植物中国沙棘生长对外源植物激素的响应 [J]. 生态学报, 2010, 30(3): 659–667.
Li TJ, Li GQ, He B, Xu DB. The growth of clonal plant *Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis* in response to exogenous plant hormones [J]. *Ecological Journal*, 2010, 30(3): 659–667.
- [18] Goto N, Miyazaki H, Nakamura NN, Terai H, Ishida N, Mitamura O. Relationships between electron transport rates determined by pulse amplitude modulated (PAM) chlorophyll fluorescence and photosynthetic rates by traditional and common methods in natural freshwater phytoplankton [J]. *Fund Appl Limnol*, 2008, 172(2): 121–134.
- [19] 许大全. 植物光胁迫研究中的几个问题 [J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(5): 493–495.
- Xu DQ. Several problems in the research of plant light stress [J]. *Plant Physiology Communications*, 2003, 39(5): 493–495.
- [20] 王明. 外源植物生长调节剂提高番茄幼苗弱光逆境适应性的生理效应 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [21] 许大全, 张玉忠, 张荣锐. 植物光合作用的光抑制 [J]. 植物生理学通讯, 1992(4): 237–243.
Xu DQ, Zhang YZ, Zhang RX. Photoinhibition of photosynthesis in plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 1992(4): 237–243.
- [22] 胡留杰, 彭予咸, 徐泽, 邓敏, 谢堃, 皮利. 植物生长调节剂对茶新梢叶绿素荧光参数日变化的影响 [J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1459–1462.
Hu LJ, Peng YX, Xu Z, Deng M, Xie K, Pi L. Effects of plant growth regulators on daily change of chlorophyll fluorescence of tea shoots [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(4): 1459–1462.
- [23] 孙华, 孙波, 张桃林. 中亚热带典型生态系统及其主要植物光合生理生态特性研究 [J]. 中国生态农业学报, 2002(2): 11–13.
Sun H, Sun B, Zhang TL. The photosynthesis of the typical ecosystems and their primary plants in the middle subtropical zone [J]. *Chinese Journal of Ecological Agriculture*, 2002(2): 11–13.
- [24] 郑国琦, 许兴, 徐兆桢, 刘振荣. 盐胁迫对枸杞光合作用的气孔与非气孔限制 [J]. 西北植物学报, 2002(6): 75–79.
Zheng GQ, Xu X, Xu ZZ, Liu ZR. The effect of salt stress on the stomatal and nonstomatal limitation of photosynthesis of *Lycium barbarum* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2002(6): 75–79.
- [25] 徐萍, 李进, 吕海英, 李永洁, 张侠. 干旱胁迫下水杨酸对银沙槐子叶表皮气孔开度的影响 [J]. 植物生理学报, 2014, 50(4): 510–518.
Xu P, Li J, Lu HY, Li YJ, Zhang X. Effect of salicylic acid on stomata aperture of epidermis in *Ammodendron argenteum* cotyledon under drought stress [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(4): 510–518.
- [26] 郭连金, 杜佳朋, 吴艳萍, 肖志鹏, 廖婷, 邵秀娟. 香果树实生苗的光合特性及其与环境因子的关系 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1473–1481.
Guo LJ, Du JP, Wu YP, Xiao ZP, Liao T, Shao XJ. Photosynthetic characteristics of *Emmenopterys henryi* seedlings and their relationships with environmental factors [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1473–1481.
- [27] 曲天明. DCPTA 对寒地玉米叶片光合特性及根系生长的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.