

不同砧木对楸树嫁接苗生长及光合特性的影响

贾瑞瑞¹, 祝艳艳¹, 杨秀莲^{1*}, 付 钰¹, 岳远征¹, 王良桂^{1,2}

(1.南京林业大学风景园林学院, 江苏省风景园林重点实验室, 江苏 南京 210037; 2.南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要:【目的】分析不同梓树(*Catalpa ovata*)和滇楸(*C. fargesii*)嫁接苗第1年各生长指标和光合特性的差异,探究不同砧木对楸树(*C. bungei*)嫁接苗生长的影响,为初步筛选适宜楸树嫁接的砧木以及楸树良种繁育提供参考。【方法】以梓树和滇楸为砧木,以‘南林1号’(‘Nanlin 1’)‘洛楸’(‘Luoqiu’)和‘苏楸1号’(‘Su 1’)为接穗,进行芽接,共6个嫁接组合,测定嫁接后128、141、155、174和189 d的叶绿素含量、净光合速率与叶绿素荧光参数,并统计嫁接6个月后的成活率,测定接穗当年的高生长和径生长量及生长1年后嫁接接口上下径粗度比。【结果】6种砧穗组合中‘南林1号’/滇楸的成活率最高,达76.91%,‘苏楸1号’/滇楸成活率最低,仅有32.05%;‘南林1号’/梓树的接穗高生长和径生长量最大,分别为165.51、2.89 cm,‘苏楸1号’/滇楸的接穗高生长和径生长量最小,分别为83.43、1.63 cm。各嫁接组合嫁接接口上下径粗度比均小于1,嫁接生长第1年,均未出现“大小脚”现象,但‘苏楸1号’/滇楸亲和性最差。在整个生长测定期,除以‘苏楸1号’为接穗的嫁接组合外,滇砧嫁接组合的叶绿素含量、净光合速率(P_n)、PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)及PSⅡ潜在活性(F_v/F_o)总体上均不同程度地大于梓砧嫁接组合。不同嫁接组合和生长时期均对叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量和 P_n 产生显著影响。嫁接后155 d,各组合差异显著, P_n 与叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量均呈显著正相关($P < 0.05$),‘南林1号’/滇楸、‘洛楸’/滇楸叶绿素含量较高,其能量转换效率高、光合能力强; P_n 与 F_m (最大荧光)、 F_v/F_o 呈显著正相关,‘苏楸1号’/滇楸和‘苏楸1号’/梓树组合 P_n 和 F_v/F_o 较低, F_o 较高,说明其耐强光能力较弱。【结论】初步判断认为‘南林1号’和‘洛楸’以滇楸作砧木时,发展潜力更大,而‘苏楸1号’以梓树作砧木时,综合表现更好。该研究仅分析各砧穗组合嫁接第1年的生长差异,后期生长状况以及是否出现“大小脚”现象还需进一步探究。

关键词:楸树;砧穗组合;光合特性;叶绿素荧光;生长状态

中图分类号:S688;S718

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2023)05-0097-10



Effects of different rootstocks on growth and photosynthetic characteristics of grafted seedlings of *Catalpa bungei*

JIA Rui¹, ZHU Yanyan¹, YANG Xiulian^{1*}, FU Yu¹, YUE Yuanzheng¹, WANG Lianggui^{1,2}

(1.Key Laboratory of Landscape Architecture of Jiangsu Province, College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2.Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract:【Objective】This study mainly analyzed the differences in the growth indexes and photosynthetic characteristics of different *Catalpa ovata* and *C. fargesii* grafted seedlings in the first year, and studied the effect of different rootstocks on the growth of *C. bungei* grafted seedlings, to provide a basic reference for the preliminary screening of suitable rootstocks for *C. bungei* grafting and subsequent in-depth research.【Method】*C. ovata* and *C. fargesii* were used as rootstocks, and *C. bungei* ‘Nanlin 1’, *C. bungei* ‘Luoqiu’ and *C. bungei* ‘Su 1’ were used as scions. There were six grafting combinations in total. The chlorophyll content, net photosynthetic rates and chlorophyll

收稿日期 Received: 2022-01-05

修回日期 Accepted: 2022-05-15

基金项目:江苏省农业科技自主创新项目(CX(19)2038);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者:贾瑞瑞(371627553@qq.com)。*通信作者:杨秀莲(yangxl339@126.com),教授。

引文格式:贾瑞瑞,祝艳艳,杨秀莲,等.不同砧木对楸树嫁接苗生长及光合特性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(5):97-106.JIA R R, ZHU Y Y, YANG X L, et al. Effects of different rootstocks on growth and photosynthetic characteristics of grafted seedlings of *Catalpa bungei*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(5): 97-106. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202201003.

fluorescence parameters were measured at 128, 141, 155, 174 and 189 d after grafting. After 6 months, the survival rate of each grafting combination was counted. The height and diameter growth of scions in the current year and the ratio of upper to lower diameters of grafting interface after one year were measured. 【Result】The survival rate of *C. bungei* ‘Nanlin 1’/*C. fargesii* was the highest among the six grafting combinations, reaching 76.91%. The survival rate of *C. bungei* ‘Su 1’/*C. fargesii* was the lowest, only 32.05%. The scion height and diameter growth of *C. bungei* ‘Nanlin 1’/*C. ovata* were the largest, 165.51 and 2.89 cm, respectively. The scion height and diameter growth of *C. bungei* ‘Su 1’/*C. fargesii* were the smallest, 83.43 and 1.63 cm respectively. The ratio of upper to lower diameter of each grafting combination was less than 1, and there was no phenomenon of ‘big and small feet’ in the first year of grafting growth. However, the compatibility of *C. bungei* ‘Su 1’/*C. fargesii* was the worst. In the whole growth period, except for the grafting combination with *C. bungei* ‘Su 1’ as scion, the chlorophyll content, net photosynthetic rate (P_n), maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m) and potential activity of PS II (F_v/F_o) of the grafting combination with *C. fargesii* as rootstock were generally higher than those with *C. ovata* as rootstock. Different grafting combinations and growth periods had significant effects on P_n , the content of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll the content of. 155 days after grafting, significant differences were among the combinations. P_n was significantly positively correlated with content of chlorophyll a, chlorophyll b and total chlorophyll ($P < 0.05$). *C. bungei* ‘Nanlin 1’/*C. fargesii* and *C. bungei* ‘Luoqiu’/*C. fargesii* had a high chlorophyll content, high energy conversion efficiency and strong photosynthetic ability. P_n was significantly positively correlated with F_m (maximum fluorescence) and F_v/F_o . P_n and F_v/F_o of *C. bungei* ‘Su 1’/*C. fargesii* and *C. bungei* ‘Su 1’/*C. ovata* combinations were lower and F_o (initial fluorescence) was higher, indicating that their ability to withstand strong light was weak. 【Conclusion】To sum up, the preliminary judgment showed that when *C. bungei* ‘Nanlin 1’ and *C. bungei* ‘Luoqiu’ used *C. fargesii* as rootstock, the development potential was greater. While when *C. bungei* ‘Su 1’ used *C. ovata* as rootstock, the comprehensive performance was better. This study only analyzed the growth difference of each rootstock-scion combination in the first year of grafting. The growth condition in the later stage and whether there are ‘big and small feet’ need to be further explored.

Keywords: *Catalpa bungei*; rootstock and scion combination; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence; growth state

楸树(*Catalpa bungei*)是紫葳科(Bignoniaceae)梓树属的落叶乔木,在我国已有2 000多年的栽培历史,以材质优良而著称,素有‘木王’美誉,具有极高的研究和开发利用价值^[1]。由于楸树自花不育,很少结实且种子发芽率低,扦插生根困难,严重制约了楸树的推广^[2-3]。嫁接技术对于木本植物的快速繁殖和优良性状保持等具有重要的应用价值^[4-5]。目前,生产实践中培育优良楸树无性系苗木最常用的方法是嫁接繁殖,通常以梓树(*C. ovata*)做砧木。梓树易结实,播种后易获得实生苗砧木,且嫁接早期亲和性较强,利于扩大楸树繁殖系数。经多年嫁接观察,梓砧嫁接苗生长3年以后因砧木和接穗的生长速度差异,易出现“大小脚”(嫁接口以上的部位和嫁接口以下的部位由于生长速度不一致,导致二者粗细不同)现象,且嫁接处木质部愈合不良造成断层、根系易受线虫危害等问题,从而影响楸树成材^[6]。因此,需要寻求更适宜的砧木以克服上述问题,确保嫁接苗的成材。

目前,有关楸树的研究大多集中在楸树无性系的抗逆性^[7]、光合特性^[8]、生长^[9]等方面,而对楸

树砧木的选择及树体嫁接后的亲和性、光合、叶绿素荧光等生理特性的研究还较少。叶绿素含量、净光合速率和叶绿素荧光参数等指标可反映不同砧穗嫁接组合的光合作用能力,也是评价嫁接苗生态适应性的基础,在植物的生长发育^[10-11]及良种选育^[12-13]等研究中可提供必要的参考价值。嫁接苗光合作用的整体变化趋势受接穗的影响,而其光合能力在实际生长中受砧木的调节^[14]。选择适宜的砧木有利于提高楸树嫁接苗光合能力进而改善植株生长势。

滇楸(*C. fargesii*)是灰楸(*C. fargesii*)的变型,结实量大,实生苗易得,且适应性强,生长速度快,具有较强的抗逆性和较好的遗传品质,但目前很少用作楸树的砧木^[15-17]。因此,本研究以梓树和滇楸为砧木,以‘南林1号’(*C. bungei* ‘Nanlin 1’)、‘洛楸’(*C. bungei* ‘Luoqiu’)和‘苏楸1号’(*C. bungei* ‘Su 1’)为接穗进行芽接,分析不同砧穗组合的生长、光合及叶绿素荧光等指标变化,探究不同砧木对嫁接苗光合性能的影响,为筛选优良楸树嫁接砧木及楸树良种繁育提供理论依据和实

践参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料和试验地概况

以南京林业大学楸树资源圃多年生楸树‘南林1号’‘洛楸’‘苏楸1号’为采穗母株,以1年生的梓树和滇楸田间无病虫害的健壮实生苗为砧木。于南京市溧水区白马镇南京林业大学白马科研基地进行嫁接试验(119°18′45″ E,31°58′36″ N),白马镇属于北亚热带向中亚热带的过渡区,四季分明,水热同季,无明显地域差别。气候温润,年均气温为15.4℃;雨量充足,年均降水量可达1 087.4 mm;光照丰沛,年均日照时长多达2 240 h;无霜期长,多达237 d。

1.2 试验设计

试验设定6种楸树嫁接组合(表1)。嫁接试验于2020年4月中旬进行,采用芽接方法进行嫁接,选择‘南林1号’‘洛楸’‘苏楸1号’接穗母株健壮的当年生枝条,每个枝条上选定1个饱满叶芽,将其削成长约1.5 cm、宽约0.8 cm的盾形芽片。选择直径约为1 cm、长度约为18 cm的田间实生苗为砧木,距离地面10~15 cm处削成与芽片大小相同的切口,将接穗插入砧木切口,叶柄朝上,用薄膜绑扎,露出叶芽。各嫁接组合采用完全随机区组设计,每个组合3个重复,每个重复65株嫁接苗。嫁接苗种植间距为150 cm×60 cm。整个生长期对6种砧穗组合进行施肥除草等常规田间管理。

表1 6种楸树嫁接组合

Table 1 Six grafting combinations of *C. bungei*

编号 No.	接穗 scion	砧木 rootstock	简称 abbreviation
1	‘南林1号’	梓树	NZ
2	‘洛楸’	梓树	LZ
3	‘苏楸1号’	梓树	SZ
4	‘南林1号’	滇楸	ND
5	‘洛楸’	滇楸	LD
6	‘苏楸1号’	滇楸	SD

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标及成活率

于生长旺盛的8月开始,根据试验测定指标要求,在不同时期取样测定或采集数据。

1)成活率。以接穗芽萌动作为判断嫁接成活的标准,嫁接后15 d进行各嫁接苗的成活状况初步观测,接芽新鲜、叶柄一触即落则为成活;芽片萎缩、颜色较黑、触而不落则为未成活。嫁接后6个

月统计各嫁接组合的成活状况,新梢由嫁接部位接穗长出则为成活,成活率为成活株数占嫁接总数量的百分比。

2)新梢高生长和粗生长。于2020年12月初,每个楸树嫁接组合随机选择30株,用游标卡尺测定距新梢基部5 cm处的直径,为新梢当年粗生长量。用卷尺测定嫁接部位到新梢顶端的长度,为新梢当年高生长量。

3)嫁接口上下径的粗度比。2021年4月29日进行测定,用游标卡尺测量距离嫁接口上下5 cm处新梢和砧木的粗度,每个嫁接组合随机测定30株,3次重复,求出嫁接口上下粗度比。

1.3.2 叶绿素含量测定

分别于嫁接后128、141、155、174和189 d,取各嫁接组合接穗新梢顶端由上至下第4~5片成熟叶进行叶绿素含量的测定。每个组合各取12株嫁接苗,每组合取3个平行样用于叶绿素含量测定。采用丙酮-乙醇浸取法^[18]进行测定。

1.3.3 光合参数

测定时间与叶绿素测定时间一致,每次测定均选天气晴朗之日,使用Ciras-3型便携式光合作仪(英国PP-System公司)测定6种楸树嫁接组合光合参数。每个嫁接组合选择生长健壮的3株苗木,每株选择接穗新梢顶端由上至下第4片成熟叶进行测定,每株测定重复3次。于9:00—11:30进行,设定有效光辐射为1 200 μmol/(m²·s),CO₂浓度380~420 μmol/mol,叶室温度25℃、湿度80%。测定包括净光合速率(P_n)。

1.3.4 叶绿素荧光参数

测定时间和叶片均与光合指标测定一致,选用Handy PEA(Hansatech Instrument Ltd.UK)进行叶片活体测定。测定前,避开叶片主叶脉夹住叶片,暗适应20 min,移开叶夹,测定暗适应下的初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、PSⅡ最大光能转化率(F_v/F_m)及PSⅡ潜在活性(F_v/F_o)。

1.4 数据处理及分析

采用SPSS 26.0进行方差分析,并采用Duncan’s新复极差法分析处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同砧穗组合楸树嫁接苗的成活率和接穗生长量

2.1.1 嫁接成活率比较

嫁接后6个月,除NZ与SZ和LZ与LD组合差异不显著外,其他各嫁接组合的成活率均存在显

著差异($P<0.05$,表 2)。其中,ND 组合成活率达到 76.91%,是 SD 组合的 2.4 倍,显著高于其他嫁接组合。除 LZ 和 LD 嫁接组合外,接穗相同的组合间的成活率均存在显著差异,其中 ND 比 NZ 成活率高 30.18%,SZ 比 SD 成活率高 90.17%。

2.1.2 新梢长度和粗度比较

经测定可知,NZ 组合新梢最长且粗度最大,长达 165.51 cm,粗达 2.89 cm,SD 组合新梢最短且最细,长仅为 83.43 cm,粗为 1.63 cm(表 2)。相同砧木不同接穗的嫁接组合间,NZ、LZ 组合的新梢长度显著大于 SZ 组合,新梢粗度由大到小依次为 $NZ>LZ>SZ$,且均存在显著性差异;ND、LD 组合新梢长度和粗度显著大于 SD 组合。总体上,梓砧嫁接组合的新梢长度和粗度均不同程度地大于滇砧嫁接组合。

2.1.3 嫁接口上下径的粗度比

嫁接生长 1 年后,各砧木砧穗组合的嫁接口上下径粗度差异显著(表 2),6 种砧穗组合的嫁接口粗度比均小于 1,暂时均未出现“大小脚”现象。其中,NZ 组合的嫁接口上下径粗度比最大(0.933),显著高于其他组合,LD 组合砧穗粗度比次之(0.891),SD 组合的砧穗粗度比最小(0.721),表明 SD 组合愈合状况最差。

表 2 苗木的嫁接成活率及生长情况
Table 2 Graft survival ratios and growth condition of plants

嫁接组合 grafting combination	成活率/% survival rate	新梢高 生长量/cm high scion growth	新梢粗 生长量/cm scion diameter growth	嫁接口上下 径粗比 ratio of scion diameter to stock diameter
NZ	59.08±1.46 c	165.51±4.85 a	2.89±0.92 a	0.933±0.124 a
ND	76.91±1.57 a	122.60±6.37 c	2.47±0.65 b	0.840±0.245 cd
LZ	72.35±2.25 b	159.06±11.05 a	2.34±1.09 b	0.885±0.071 bc
LD	73.22±3.76 b	139.25±14.32 b	2.27±1.69 b	0.891±0.065 b
SZ	60.95±2.33 c	107.51±12.25 d	1.94±1.30 c	0.822±0.029 d
SD	32.05±1.42 d	83.43±5.06 e	1.63±2.09 d	0.721±0.087 e

注:同列数据后不同小写字母表示不同砧木砧穗组合间差异显著($P<0.05$)。Values followed by the different lowercase letters in the same column mean significant difference at $P<0.05$ level.

2.2 不同砧木砧穗组合的叶绿素含量及净光合速率比较

对 6 种砧木砧穗组合在嫁接后 5 个生长时期的叶绿素含量及净光合速率共 4 个参数的双因素方差分析表明(表 3),不同嫁接组合之间的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量及净光合速率均差异极显著($P<0.01$);嫁接后不同的生长时间也对叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量及净光合速率的影响

极显著($P<0.01$),不同的嫁接组合和生长时间的交互效应也对叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量及净光合速率有极显著影响($P<0.01$)。

表 3 不同嫁接生长时间下 6 种砧木砧穗组合的叶绿素含量及净光合速率的方差分析结果

Table 3 Analysis of variance results of chlorophyll content and net photosynthetic rate of six *Catalpa bungei* stock and scion combinations under different grafting growth time

指标 index	嫁接组合 grafting combination		嫁接时间 grafting time		嫁接组合× 嫁接时间 grafting combination× grafting time	
	F	P	F	P	F	P
叶绿素 a 含量 Chl a content	92.231	<0.01	60.259	<0.01	7.265	<0.01
叶绿素 b 含量 Chl b content	83.321	<0.01	42.334	<0.01	5.126	<0.01
总叶绿素含量 Chl (a+b) content	90.587	<0.01	50.947	<0.01	3.888	<0.01
净光合速率 net photosynthetic rate	19.564	<0.01	204.873	<0.01	4.935	<0.01

1)对叶绿素 a 含量(Chl a)的影响。LZ 组合的 Chl a 随生长期的延长呈“降—升—降”的趋势,除 141 和 174 d 外,各个生长期均差异显著。而其他嫁接组合均呈先升后降的趋势,嫁接后 141~155 d,各组合 Chl a 达最大值(表 4)。就相同接穗组合而言,除嫁接后 155 d 外,ND 组合的 Chl a 在其他生长期均大于 NZ 组合,且在生长后期差异显著;嫁接 128 d 后,LD 组合的 Chl a 均高于 LZ 组合且差异显著;在生长前期,SZ 组合的 Chl a 均高于 SD 组合。

2)对叶绿素 b 含量(Chl b)的影响。由表 5 可知,相同接穗的两组合比较,嫁接后 141 d,ND 组合 Chl b 显著高于 NZ 组合,随后 ND 逐渐降低;相同生长期 LD 组合的 Chl b 均大于 LZ,且 141 d 时 LD 组合的 Chl b 是 LZ 的 1.46 倍;除 128 d 外,相同生长期 SZ 组合的 Chl b 均大于 SD,但生长前期两组合无显著差异。梓砧组合中,LZ 组合的 Chl b 呈“降—升—降”的波动变化,嫁接后 128 d 时 Chl b 最大,与其他时期差异显著;NZ 和 SZ 组合呈先升后降的变化趋势,嫁接后 155 d 分别比 128 d 显著升高了 28.44%、21.61%。滇砧组合中,各组合均呈先升后降的趋势,ND 和 LD 组合的 Chl b 在嫁接后 141 d 达到最大,并且该时期 ND 组合和 LD 组合的 Chl b 分别比 SD 组合高 66.21%、38.39%。

表 4 不同楸树砧穗组合对叶绿素 a 含量的影响

Table 4 Effects of different rootstock-scion combinations of *C. bungei* on chlorophyll a content

嫁接时间/d grafting time	叶绿素 a 含量/(mg·g ⁻¹) chlorophyll a content					
	NZ	ND	LZ	LD	SZ	SD
128	1.826±0.065 Ab	1.875±0.059 Aa	1.825±0.025 Ab	1.807±0.032 Bb	1.654±0.067 Cc	1.624±0.041 BCc
141	1.853±0.042 Aa	1.876±0.041 Aa	1.695±0.033 Cb	1.859±0.030 Aa	1.709±0.046 Bb	1.657±0.042 Bc
155	1.862±0.053 Aa	1.852±0.037 Aa	1.751±0.041 Bc	1.851±0.031 Aa	1.786±0.024 Ab	1.736±0.036 Ac
174	1.805±0.014 Bb	1.844±0.036 ABa	1.689±0.032 Cc	1.791±0.036 Bb	1.714±0.025 Bc	1.592±0.040 Cd
189	1.788±0.025 Bb	1.835±0.029 Ba	1.586±0.025 Dd	1.642±0.040 Cc	1.382±0.034 Df	1.506±0.028 De

注:同列数据后不同大写字母表示同一嫁接组合不同取样时间在 0.05 水平上差异显著,不同小写字母表示同一取样时间不同嫁接组合在 0.05 水平上差异显著。下同。Different uppercase letters in the same column indicate that the same combination has significant difference at the level of 0.05 at different sampling time.Different lowercase letters indicate that the grafting combinations at the same time have significant differences at the level of 0.05. The same below.

表 5 不同楸树砧穗组合对叶绿素 b 含量的影响

Table 5 Effects of different rootstock-scion combinations of *C. bungei* on chlorophyll b content

嫁接时间/d grafting time	叶绿素 b 含量/(mg·g ⁻¹) chlorophyll b content					
	NZ	ND	LZ	LD	SZ	SD
128	0.552±0.009 Bb	0.678±0.017 Ba	0.530±0.015 Ab	0.541±0.026 ABb	0.398±0.013 Bc	0.406±0.015 Bc
141	0.592±0.021 Bb	0.723±0.033 Aa	0.413±0.014 Bc	0.602±0.049 Ab	0.438±0.025 ABc	0.435±0.042 Ac
155	0.709±0.010 Aa	0.568±0.069 Cb	0.443±0.020 Bc	0.584±0.027 Ab	0.484±0.013 Ac	0.443±0.023 Ac
174	0.594±0.011 Ba	0.528±0.018 Cb	0.410±0.013 Bd	0.493±0.008 Bc	0.409±0.016 Bd	0.347±0.035 Ce
189	0.485±0.015 Cb	0.524±0.021 Ca	0.341±0.034 Cc	0.359±0.021 Cc	0.367±0.037 Cc	0.301±0.011 Cd

3)对总叶绿素含量[Chl(a+b)]的影响。嫁接后随着生长时间的延长,LZ 组合 Chl(a+b)呈“降—升—降”的动态变化;嫁接后 128 d,与 LD 组合相比,LZ 组合的 Chl(a+b)无显著变化,但其他相同生长期 LZ 组合的 Chl(a+b)均显著小于 LD 组合;其他嫁接组合总体呈现先升后降的变化规律(表 6)。NZ 组合 Chl(a+b)生长前期显著低于 ND

组合,而后逐渐上升至 155 d 显著高于 ND 组合;除嫁接后 189 d 外,其他时期 SZ 组合 Chl(a+b)均大于 SD,155 d 时,SZ 组合 Chl(a+b)比 128 d 升高了 10.63%,与其他时期差异显著。以‘南林 1 号’为接穗的两个组合 NI 与 ND 的 Chl(a+b)在嫁接后均高于其他组合。

表 6 不同楸树砧穗组合对总叶绿素含量的影响

Table 6 Effects of different rootstock-scion combinations of *C. bungei* on total chlorophyll content

嫁接时间/d grafting time	总叶绿素含量/(mg·g ⁻¹) total chlorophyll content					
	NZ	ND	LZ	LD	SZ	SD
128	2.395±0.093 Bb	2.553±0.086 Aa	2.355±0.056 Ab	2.348±0.049 ABb	2.051±0.050 Cc	2.030±0.112 Bc
141	2.445±0.086 ABb	2.598±0.085 Aa	2.109±0.098 Bc	2.461±0.092 Ab	2.147±0.109 Bc	2.092±0.082 Bc
155	2.571±0.060 Aa	2.419±0.056 Bb	2.196±0.047 Bd	2.436±0.059 Ab	2.269±0.039 Ac	2.180±0.085 Ad
174	2.425±0.055 Ba	2.372±0.100 Bab	2.101±0.096 Bc	2.285±0.079 Bb	2.123±0.096 BCc	1.939±0.071 Cd
189	2.273±0.064 Cb	2.359±0.052 Ba	1.926±0.044 Bd	2.006±0.105 Cc	1.749±0.054 Df	1.814±0.060 De

4)对净光合速率(P_n)的影响。6 种砧穗组合的 P_n 随生长时间的延长呈先上升后下降的变化规律(表 7),其中 NZ、SD 组合的 P_n 在嫁接后 141 d 达最大值,分别比 128 d 时显著升高了 40.35%、43.81%;而其余嫁接组合的 P_n 均在 155 d 时达最

大值。嫁接后 155 d,ND 组合的 P_n 增长率高达 39.4%,与其他时期差异显著,且显著大于 NZ 组合;在整个观测期,LD 组合的 P_n 均高于 LZ 组合;155 d 时,SZ 组合的 P_n 显著高于 SD 组合。6 种砧穗组合中,ND 组合的 P_n 在嫁接后 128、155 d 均为

最高,分别为 13.25、18.47 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,而 SD 组合的 P_n 在整个生长期都较低。

表 7 不同砧穗组合对净光合速率 P_n 的影响

嫁接时间/d grafting time	净光合速率/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ net photosynthetic rate					
	NZ	ND	LZ	LD	SZ	SD
128	11.35±0.50 Bc	13.25±0.63 Ba	12.27±0.72 Bb	12.88±0.64 Cab	11.23±0.41 Cc	9.77±0.45 Bd
141	15.93±0.71 Aa	14.23±0.60 Bb	13.07±1.67 Bab	14.65±1.23 Bab	13.67±1.58 Bb	14.05±2.39 Aab
155	15.77±0.69 Acd	18.47±0.45 Aa	16.83±2.51 Abc	17.26±1.10 Aab	15.17±0.51 Ad	13.62±0.43 Ae
174	10.78±1.38 BCbc	11.40±1.10 Cb	10.76±1.02 Cbc	13.73±2.19 BCa	10.68±1.32 Cbc	9.48±0.80 Bc
189	9.83±0.49 Cab	10.45±0.85 Cab	9.32±0.33 Cbc	9.53±0.93 Dbc	8.88±0.73 Dc	6.77±0.55 Cd

2.3 不同砧穗嫁接组合的叶绿素荧光参数比较

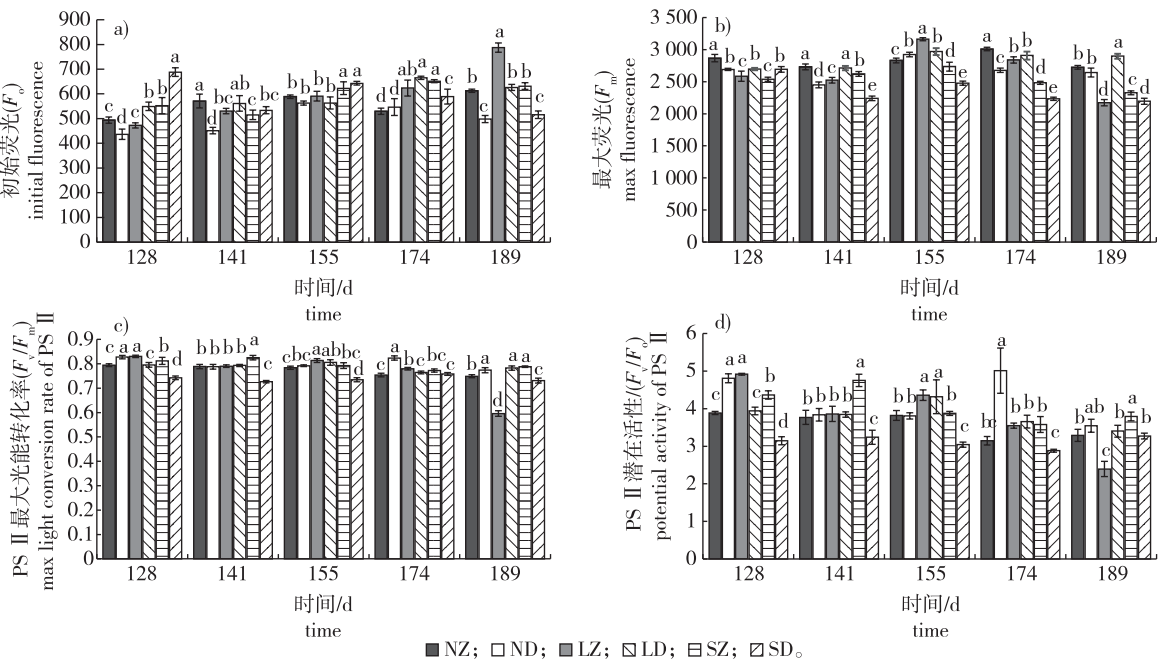
在整个生长测定期内,LZ 组合的初始荧光(F_0)逐渐上升,在嫁接后 189 d 达最大值,与其他组合差异显著,其他嫁接组合均呈波动性变化,SD 组合的 F_0 在嫁接后 128 d 时最大,说明 SD 组合在强光期受到了光抑制。ND 组合的 F_0 在各时期均较低,表明其对强光有较好的耐受性(图 1a)。

由图 1b 可知,LD 和 SZ 组合的最大荧光(F_m)随生长期呈现先升高后降低的变化趋势,而其余嫁接组合的 F_m 先降低后升高再降低。除 NZ 和 SD 外,其他嫁接组合的 F_m 在 155 d 时达最大值。

整个生长期不同嫁接组合的 PS II 最大光能

转化率(F_v/F_m)变化不大,同一生长期内部嫁接组合间的 F_v/F_m 值差异显著(图 1c)。植物受到环境因子的胁迫程度越高 F_v/F_m 越低^[19]。嫁接 155 d 后,ND 组合的 F_v/F_m 显著高于 NZ 组合,表明 NZ 组合的抗胁迫能力比 ND 弱。

6 个嫁接组合的 PS II 潜在活性(F_v/F_0)随生长期变化有差异(图 1d),ND、LZ 和 LD 组合叶片的 F_v/F_0 随生长期呈现先下降后上升再下降的变化趋势,而 NZ、SZ、SD 组合先上升后下降再上升。除 189 d 外,在同一生长期,相较于其他嫁接组合,SD 组合的 F_v/F_0 均为最低。



不同小写字母表示同一取样时间不同嫁接组合在 0.05 水平上差异显著。Different lowercase letters indicate that the grafting combinations at the same time have significant differences at the level of 0.05.

图 1 不同砧穗组合初始荧光(F_0)、PSII最大荧光(F_m)、PSII最大光能转化率(F_v/F_m)和 PSII潜在活性(F_v/F_0)的变化
Fig. 1 The changes of initial fluorescence (F_0), max fluorescence (F_m), max light conversion rate of PS II (F_v/F_m) and potential activity of PS II (F_v/F_0) in leaves of different rootstock-scion combinations

2.4 不同嫁接组合的光合及叶绿素荧光参数等指标的相关性分析

各嫁接组合各指标几乎均在嫁接后 141、155 d 时达最大值,因此选择嫁接后 141 和 155 d 的数据进行相关性分析(表 8)。 P_n 与各个参数之间均有

不同程度的相关性。 F_m 、 F_v/F_o 与 P_n 呈显著性正相关(R 为 0.424、0.406)。 $Chla$ 、 $Chlb$ 、 $Chl(a+b)$ 含量也均与 P_n 呈显著性正相关(R 为 0.587、0.551、0.584)。

表 8 净光合速率与叶绿素含量及叶绿素荧光参数的相关系数

Table 8 The correlation coefficients of P_n and chlorophyll content and chlorophyll fluorescence parameters								
指标 index	Chla	Chlb	Chl(a+b)	F_o	F_m	F_v/F_m	F_v/F_o	P_n
Chla	1							
Chlb	0.855 *	1						
Chl(a+b)	0.966 *	0.959 *	1					
F_o	-0.054	-0.148	-0.104	1				
F_m	0.599 *	0.495 *	0.578 *	0.096	1			
F_v/F_m	0.428 *	0.416 *	0.436 *	0.078	0.486 *	1		
F_v/F_o	0.433 *	0.409 *	0.430 *	0.269	0.358	0.859 *	1	
P_n	0.587 *	0.551 *	0.584 *	0.084	0.424 *	0.315	0.406 *	1

注: * . $P<0.05$ 。

3 讨 论

3.1 嫁接成活率和生长量

嫁接是植物繁殖的主要方式,嫁接苗应用推广需考虑的最重要因素是砧穗组合间的嫁接亲和性^[20]。嫁接亲和性最直观的判断依据是嫁接成活率^[21-22],如果接穗和砧木的亲缘关系近,嫁接成活率就高,反之则成活率低^[23]。李娜等^[24]研究表明以枫杨为砧木的嫁接组合成活率高于以薄壳山核桃为砧木的嫁接组合,主要是由于青钱柳与枫杨的亲缘关系比薄壳山核桃近。本研究中,滇砧和梓砧的嫁接成活率随接穗品种的不同而异,ND 组合成活率(76.91%)显著高于 NZ 组合(59.08%);SZ 组合的成活率也显著高于 SD 组合;而 LZ、LD 组合间差异不显著。梓树、滇楸嫁接楸树均属种间嫁接,砧木和接穗的亲缘关系都比较近,且两种砧木在华东地区的生长适应性良好^[25-26],因此,出现成活率差异主要与接穗品种有关。

砧穗亲和性影响嫁接苗的生长状态及健康状况,这种影响可通过嫁接后植株的新梢长度和粗度、叶片生物量等进行判断。在本研究中,梓砧嫁接组合的新梢长度和粗度均不同程度大于滇砧嫁接组合,可能是因为梓树是浅根性树种,早期根系吸收水分和矿质营养的能力较强,从而促进了接穗的生长^[27],而滇楸为深根性树种,早期幼苗生长相对缓慢。另外,嫁接后第 1 年,各楸树砧穗组合的嫁接口上下径粗度比均小于 1,表明各组合嫁接第 1 年生长良好,均未出现“大小脚”现象。但各嫁接组合上下径粗度比与成活率及新梢长度和粗度变

化不一致,NZ 组合的嫁接口上下径粗度比最大,其成活率却不是最大,ND 组合成活率最大,其嫁接口上下径粗度比、新梢长度和粗度也不是最大,说明嫁接组合的亲和性是多种指标共同作用的结果,仅靠单一指标判断嫁接亲和性会产生较大误差^[28]。同一接穗嫁接到不同砧木后,嫁接苗的表型、生长状况、生理生化特性及基因表达都有所改变^[29]。外界环境相同时,同一接穗不同砧木的树体生长势和光合能力与砧木自身的遗传特性有关,接穗的生长发育受砧木与接穗间的水分、营养物质和生长调节物的运输等条件的影响^[30-31]。因此,各楸树砧穗组合生长差异的具体原因有待深入研究。

3.2 净光合速率和叶绿素含量

光合作用在植物能量储备、物质积累、生长发育等方面起着重要作用,可以影响植物生长。净光合速率是评价植株光合能力的基础指标。植物功能叶中叶绿素含量的高低在一定程度上也会影响植物的光合作用强弱进而调节植株的生长状态^[32]。植物的生长是各种生命代谢活动的综合体现,通过早期的净光合速率及叶绿素含量变化可以对嫁接苗未来的生长表现进行初步判断。

研究表明砧穗间的亲和性影响嫁接苗叶绿素含量合成及净光合速率变化。龚艳箐^[33]的研究表明,亲和性较差的红绵蜜柚/枳,嫁接一段时间后叶片出现黄化,叶绿素含量急剧减少,净光合速率保持较低水平,无法正常进行光合作用。李莉等^[34]研究显示,核桃上宋-14/中宁奇亲和性较好的,其净光合速率比亲和性差的上宋-14/宁优显著升高。

在本研究中,方差分析显示,不同的楸树嫁接组合及嫁接后的生长时间均会对嫁接苗的叶绿素 a、b 及叶绿素总量产生显著影响,嫁接后 155 d 各组合指标与其他时期差异显著。在整个生长观测期,LZ 组合的 Chl a、Chl b、Chl(a+b)呈“降—升—降”的趋势,其他嫁接组合呈现先升后降的趋势。可能是因为嫁接后 128~141 d 温度较高、光照较强,温度、光照过强影响叶绿素合成,而 LZ 组合不耐强光,使叶绿素含量降低。对于其他嫁接组合,随着嫁接苗的生长,叶片成熟,叶绿素合成增加,叶绿素 a、b 及总叶绿素含量最高值均出现在嫁接后 155 d,而后继续生长,嫁接后 174 d 叶绿素含量呈现下降趋势。这种动态变化趋势主要是因为叶绿素合成需要光照,不同月份、季节的光照差异很大;同时叶绿素的生物合成过程中有不同酶的参与,嫁接后植株生长的温度对酶活性有很大影响。嫁接后 155 d 较 128 d 时,温度下降,湿度增大,光照适宜,所以各嫁接组合叶绿素含量在嫁接后 128 d 逐渐上升,至 155 d 时达到峰值随后下降。本研究中,相同接穗的两组合比较,在嫁接后 155 d 时,ND、LD 和 SZ 组合叶绿素 a、b 及总叶绿素含量均较高,其净光合速率也较高,且不同嫁接组合叶绿素含量与叶片净光合速率呈显著性正相关,叶绿体中的叶绿素含量高,能量转换效率高,光合能力强,亲和力也较好,与前人研究结果一致^[35]。

3.3 叶绿素荧光

叶绿素荧光是无损伤快速测定植物叶片光合能力的探针,可以反映外界环境因子对植物光合作用的影响^[36]。Tränkner 等^[37]的研究结果表明,植物发生光抑制时 F_v/F_m 值会降低,但在正常水平下, F_v/F_m 值差异不显著。在本研究中,嫁接组合的 F_v/F_m 值相对稳定,但其值稍偏低,说明其生长发育可能受到光抑制。其中,除嫁接后 141 d 外,梓砧组合叶片的 F_v/F_m 值均略低于相应的滇砧组合,说明梓砧组合受到轻微的光抑制,PS II 光合电子传递链受阻。 F_v/F_o 值反映 PS II 反应中心潜在的光化学活性^[38]。本研究发现,SZ、SD 嫁接组合的 F_v/F_o 在嫁接后 141 d 达到最大值,而 NZ、ND、LZ 嫁接组合均在 128 d 达最大值,说明 NZ、ND、LZ 在高光照强度下 PS II 反应中心可维持较高的光化学活性,且相对于 SZ、SD 嫁接组合,可更好地耐受强光。 F_o 反映 PS II 反应中心吸收的光能用于非光化学转化的比例, F_m 可反映 PS II 反应中心的电子传递情况。 F_o 还可以体现出植物对光能的利用效率以及光反应中心保护机制的变化, F_o 越高说

明植物对光能的利用效率越低,反之则越高^[39]。本研究中,在嫁接后 155 d,ND、LD 和 SZ 组合的 F_o 均分别不同程度地小于 NZ、LZ 和 SD 组合,且 ND、SZ 组合的 F_m 值分别高于 NZ 和 SD 组合,而 P_n 与 F_m 呈显著性正相关。此结果表明,嫁接 155 d 时的温度、光照较适宜 ND 和 LD 组合生长,ND 和 LD 组合较其他组合具有更高的电子传递效率,可以更好地将吸收的光能转化为光化学反应。砧木和接穗之间的光合和荧光特性是受内外因子相互作用、共同影响的综合反映,其内在关系及作用机制还有待进一步研究。

4 结 论

1)通过对不同楸树砧穗组合的生长、光合及叶绿素荧光特性等各个生理指标综合分析表明,ND 组合嫁接接口上下径粗度比和新稍高生长和粗生长量虽暂时低于 NZ 组合,但其光合能力和成活率显著高于 NZ 组合,未出现“大小脚”现象,具有较大的发展潜力。

2)LZ 和 LD 组合各生长指标无显著差异,但 LD 组合叶绿素含量和净光合速率较大;与 SZ 相比,SD 组合无论是生长指标还是光合能力均较差。

3)从各生理指标综合来看,‘南林 1 号’和‘洛楸’以滇楸作砧木时,生长表现较好,‘苏楸 1 号’以梓树作砧木,生长势强,光合能力优。

本研究仅分析了各嫁接组合第 1 年的生长差异,暂时均未出现“大小脚”现象,但适宜的楸树嫁接组合还需进一步考察。实际生产中,各砧穗组合后期的生长情况、抗逆性、嫁接组合亲和性以及是否出现“大小脚”现象等也是重要的评价指标。因此,后续的研究应进一步通过系统全面的评价指标测定,选择出具有生产实践价值的适宜楸树嫁接的优良砧木。

参考文献(reference):

- [1] 马仕君,彭泰来,余韵,等.生根激素和磁场对楸树嫩枝扦插生根的影响[J].东北林业大学学报,2020,48(6):21-24. MA S J, PENG T L, YU Y, et al. Effect of plant hormones and magnetic field on rooting of soft cuttings for *Catalpa bungei*[J]. J Northeast For Univ, 2020, 48(6): 21-24. DOI: 0.13759/j.cnki.LDxb.2020.06.005.
- [2] 张烨然,彭言劼,马勤,等.楸树与滇楸组培快繁技术[J].东北林业大学学报,2016,44(11):5-9,51. ZHANG Y R, PENG Y J, MA Q, et al. Rapid propagation system of *Catalpa bungei* and *C. fargesii* Bur.f. *duclouxii*[J]. J Northeast For Univ, 2016, 44(11): 5-9, 51. DOI: 10.13759/j.cnki.LDxb.2016.11.002.
- [3] 梁有旺,杜旭华,王顺财,等.楸树嫩枝扦插生根的主要影响

- 因子分析[J].植物资源与环境学报, 2008, 17(4): 46–50. LIANG Y W, DU X H, WANG S C, et al. Analysis of main influence factors on rooting of twig cutting of *Catalpa bungei*[J]. J Plant Resour and Environ, 2008, 17(4): 46–50. DOI: 10.3969/j.issn.1674–7895.2008.04.009.
- [4] MELNYK C W, MEYEROWITZ E M. Plant grafting[J]. Curr Biol, 2015, 25(5): 183–188. DOI: 10.1016/j.cub.2015.01.029.
- [5] 康向阳. 林木遗传育种研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 1–10. KANG X Y. Research progress of forest genetics and tree breeding[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(3): 1–10. DOI: CNKI:SUN: NJLY.0.2020–03–002.
- [6] 王改萍, 王良桂, 王晓聪, 等. 楸树嫩枝扦插生根发育及根系特征分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 94–102. WANG G P, WANG L G, WANG X C, et al. Dynamic characteristics of cutting rooting of *Catalpa bungei* with tender branches[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(6): 94–102. DOI: 10.3969/j.issn.1000–2006.202003082.
- [7] 吴统贵, 顾沈华, 颜福彬, 等. NaCl 胁迫对 3 个楸树无性系苗期根系特征的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(2): 67–71. WU T G, GU S H, YAN F B, et al. Effect of NaCl stress on root characteristics of three clones of *Catalpa bungei* at seedling stage[J]. J Plant Resour Environ, 2013, 22(2): 67–71. DOI: 10.3969/j.issn.1674–7895.2013.02.09.
- [8] 王军辉, 负慧玲, 冯小芹, 等. 不同砧木对灰楸生长和光合特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(10): 40–45. WANG J H, YUN H L, FENG X Q, et al. Effect of different root stock on *Catalpa fargesii* Bur growth and photosynthetic characteristics[J]. J Northeast For Univ, 2013, 41(10): 40–45. DOI: 10.13759/j.cnki.LDxb.2013.10.017.
- [9] 黄国伟, 彭婵, 马林江, 等. 不同系号楸树持续饱和水分下光合特征比较[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(8): 35–40. HUANG G W, PENG C, MA L J, et al. Growth and photosynthetic characteristics of the *Catalpa bungei* seedlings in saturated content of water in soils[J]. J Northeast For Univ, 2019, 47(8): 35–40. DOI: 10.13759/j.cnki.LDxb.2019.08.007.
- [10] 邹长明, 王允青, 刘英, 等. 四种豆科作物的光合生理和生长发育对弱光的响应[J]. 植物生态学报, 2015, 39(9): 909–916. ZOU C M, WANG Y Q, LIU Y, et al. Responses of photosynthesis and growth to weak light regime in four legume species[J]. Chin J Plant Ecol, 2015, 39(9): 909–916. DOI: 10.17521/cjpe.2015.0087.
- [11] 蔡仕珍, 李西, 潘远智, 等. 不同光照对蝴蝶花光合特性及生长发育研究[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 264–272. CAI S Z, LI X, PAN Y Z, et al. A study on photosynthetic characteristics and growth and development of *Iris japonica* under different illumination[J]. Acta Prataculturae Sin, 2013, 22(2): 264–272.
- [12] 王佩兰, 康华荣, 李柏海, 等. 乡土珍贵树种钩栗幼苗种源间光合生理特性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(3): 38–45. WANG P L, KANG H R, LI B H, et al. Photosynthetic traits of the precious native species of *Castanopsis tibetana* seedlings among different provenances[J]. J Central South Univ For Technol, 2016, 36(3): 38–45. DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923x.2016.03.008.
- [13] 武启飞, 范俊俊, 赵明明, 等. 5 个观赏海棠品种光合特性的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 64–70. WU Q F, FAN J J, ZHAO M M, et al. Study on photosynthetic characteristics of five *Ornamental crabapple* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2017, 41(4): 64–70. DOI: 10.3969/j.issn.1000–2006.201609014.
- [14] 李小红, 周凯, 谢周, 等. 不同葡萄砧木对矢富罗莎葡萄嫁接苗光合作用的影响[J]. 果树学报, 2009, 26(1): 90–93. LI X H, ZHOU K, XIE Z, et al. Photosynthesis of Yatomi Rosa on eight grape rootstocks[J]. J Fruit Sci, 2009, 26(1): 90–93.
- [15] 徐利霞, 姚小华, 杨水平, 等. 旱胁迫条件下 3 树种幼苗光合特性比较研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(5): 168–172. XU L X, YAO X H, YANG S P, et al. Effects of soil water stress on photosynthetic characteristics of three native tree species seedlings[J]. J Southwest Univ (Nat Sci Ed), 2007, 29(5): 168–172. DOI: 10.3969/j.issn.1673–9868.2007.05.035.
- [16] 张烨然, 杜克兵, 全瑞冠, 等. 3 种梓树属植物的抗涝性[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(3): 23–28. ZHANG Y R, DU K B, TONG R G, et al. Flood-tolerance comparison of three tree species belonging to *Catalpa*[J]. J Northeast For Univ, 2017, 45(3): 23–28. DOI: 10.13759/j.cnki.LDxb.2017.03.005.
- [17] 彭婵, 陈慧玲, 张新叶, 等. 楸树 SSR 标记在滇楸中的可转移性与应用[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(2): 50–55. PENG C, CHEN H L, ZHANG X Y, et al. Transferability of the *Catalpa bungei* SSRs in *Catalpa fargesii* f. *duclouxii* and its application[J]. J Northeast For Univ, 2019, 47(2): 50–55. DOI: 10.13759/j.cnki.LDxb.2019.02.012.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. LI H S. Principle and techniques of plant physiological and biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [19] 周建, 杨立峰, 郝峰鸽, 等. 低温胁迫对广玉兰幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2009, 29(1): 136–142. ZHOU J, YANG L F, HAO F G, et al. Photosynthesis and chlorophyll-fluorescence of *Magnolia grandiflora* seedlings under low temperature stress[J]. Acta Bot Boreali Occidentalia Sin, 2009, 29(1): 136–142. DOI: 10.3321/j.issn:1000–4025.2009.01.021.
- [20] FORNER-GINER M A, RODRIGUEZ-GAMIR J, MARTINEZ-ALCANTARA B, et al. Performance of Navel orange trees grafted onto two new dwarfing rootstocks (Forner-Alcaide 517 and Forner-Alcaide 418) [J]. Sci Hort, 2014, 179: 376–387. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.07.032.
- [21] 伊成勇, 孙权, 张敏, 等. 柿砧穗亲和性与叶片内源多胺种类及含量的关系[J]. 植物生理学报, 2019, 55(8): 1191–1196. YI C Y, SUN Q, ZHANG M, et al. Relationship between compatibility of rootstock-scion and the kinds and contents of endogenous polyamine in leaves of persimmon[J]. Plant Physiol J, 2019, 55(8): 1191–1196. DOI: 10.13592/j.cnki.pppj.2019.0166.
- [22] 张东来, 张玲. 高枝多头多龄异砧嫁接对红松生长和结实的影响[J]. 森林工程, 2021, 37(6): 34–38. ZHANG D L, ZHANG L. Effects of intergeneric grafting with high branch, multiple heads and different age on trees growth and fruiting of *Pinus koraiensis*[J]. Forest Engineering, 2021, 37(6): 34–38.
- [23] GOLDSCHMIDT E E. Plant grafting: new mechanisms, evolutionary implications[J]. Front in Plant Sci, 2014, 5(3): 727. DOI: 10.3389/fpls.2014.00727.
- [24] 李娜, 朱培林, 丰采, 等. 青钱柳嫁接愈合过程中砧穗生理特性及其与亲和性的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学

- 版), 2021, 45(1): 13–20. LI N, ZHU P L, FENG C, et al. Variations in physiological characteristics of rootstock-scion and its relationship to graft compatibility during the grafting union process of *Cyclocarya paliurus* [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2021, 45(1): 13–20. DOI: 10.12302/j.issn.1000–2006.202010024.
- [25] 张新叶, 李振芳, 张亚东, 等. 湖北引种滇楸优良无性系早期选择[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 24–29. ZHANG X Y, LI Z F, ZHANG Y D, et al. Early stage selection of fine clones of *Catalpa fargesii* f. *duclouxii* in Hubei Province [J]. Chin Agric Sci Bull, 2016, 32(10): 24–29. DOI: 10.11924/j.issn.1000–6850.casb15070154.
- [26] 郭从俭, 钱士金, 王连卿, 等. 楸树栽培[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998: 10–18. GUO C J, QIAN S J, WANG L Q, et al. *Catalpa bungei* cultivation [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998: 10–18.
- [27] 闫桂华. 梓树的形态结构及发育解剖学研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011. YAN G H. Study on the morphological structure and developmental anatomy of *Catalpa ovata* [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011.
- [28] WEBSTER A D, VAUGHAN S P, LUCAS A S, et al. Effects of tree age at planting, root manipulation and trickle irrigation on growth and cropping of apple (*Malus pumila*) cultivar Queen Cox on M.9 rootstock [J]. J Hort Sci Biot echnol, 2003, 78(5): 680–688. DOI: 10.1080/14620316.2003.11511684.
- [29] SOMKUWAR R G, BAHETWAR A, KHAN I, et al. Changes in growth, photosynthetic activities, biochemical parameters and amino acid profile of Thompson seedless grapes (*Vitis vinifera* L.) [J]. J Environ Biol, 2014, 35(6): 1157–1163.
- [30] CAO L W, YU N N, LI J X, et al. Heritability and reversibility of DNA methylation induced by *in vitro* grafting between *Brassica juncea* and *B. oleracea* [J]. Sci Rep, 2016, 6: 27233. DOI: 10.1038/srep27233.
- [31] RIBEIRO M A Q, DE ALMEIDA A A F, ALVES T F O, et al. Rootstock × scion interactions on *Theobroma cacao* resistance to witches' broom: photosynthetic, nutritional and antioxidant metabolism responses [J]. Acta Physiol Plant, 2016, 38(3): 73. DOI: 10.1007/s11738-016-2095-9.
- [32] 杜祥备, 王家宝, 刘小平, 等. 减氮运筹对甘薯光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1253–1260. DU X B, WANG J B, LIU X P, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction management on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of sweetpotato [J]. Chin J Appl Ecol, 2019, 30(4): 1253–1260. DOI: 10.13287/j.1001–9332.201904.012.
- [33] 龚艳箐. 蜜柚不同砧穗组合苗期嫁接亲和性及光合特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016. GONG Y J. Study on grafting compatibility and photosynthetic characteristics of different rootstock and ear combinations of honey pomelo at seedling stage [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [34] 李莉, 周贝贝, 徐慧敏, 等. 不同砧木品种对核桃树体生长及光合特性的影响[J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 472–478. LI L, ZHOU B B, XU H M, et al. Effects of different rootstock varieties on growth and photosynthetic characteristics of walnut [J]. For Res, 2017, 30(3): 472–478. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.03.016.
- [35] 徐志龙. 几种柑橘砧穗组合的生理生化特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013. XU Z L. Study on the physiological and biochemical characteristics of several *Citrus* rootstock and ear combinations [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [36] BAKER N R. A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis [J]. Physiol Plant, 1991, 81(4): 563–570. DOI: 10.1111/j.1399–3054.1991.tb05101.x.
- [37] TRÄNKNER M, JAMALI J S. Minimum magnesium concentrations for photosynthetic efficiency in wheat and sunflower seedlings [J]. Plant Physiol Biochem, 2019, 144: 234–243. DOI: 10.1016/j.plaphy.2019.09.040.
- [38] YE X, CHEN X F, DENG C L, et al. Magnesium-deficiency effects on pigments, photosynthesis and photosynthetic electron transport of leaves, and nutrients of leaf blades and veins in *Citrus sinensis* seedlings [J]. Plants (Basel), 2019, 8(10): 389. DOI: 10.3390/plants8100389.
- [39] WAN Y L, ZHANG Y X, ZHANG M, et al. Shade effects on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of three *Paeonia* species [J]. Peer J, 2020, 8: e9316. DOI: 10.7717/peerj.9316.

(责任编辑 李燕文)