

不同倍性紫果西番莲满天星的形态特征和 光合特性比较研究

杨振欣, 朱雅静, 陆庄跃, 罗 茜, 苏 鑫, 成思丽, 蔡年辉, 许玉兰, 王德新

(西南林业大学西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室/西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室, 云南昆明 650224)

摘要: 以二倍体和三倍体的紫果西番莲满天星(*Passiflora edulis*)为研究对象, 对其生长、叶片形态特征、叶绿素含量以及光合参数进行测定及分析。结果表明: (1) 紫果西番莲满天星二倍体与三倍体相比, 三倍体植株呈现矮壮、叶柄更短、叶片更窄和叶片之间的距离变短的现象。(2) 三倍体的叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量较二倍体更多, 类胡萝卜素含量相差不大。(3) 光合作用日进程中, 两个倍性均有光合作用“午休”现象, 而三倍体全天的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)均高于二倍体, 较二倍体分别提高了19.5%、6.9%、4.5%和3.9%。(4) 二倍体和三倍体满天星的月光合作用变化相似, 均在8月份达到最高值, 12月份下降到最低点, 均为单峰曲线。三倍体满天星的 P_n 、 Tr 、 G_s 均优于二倍体。(5) 两个倍性植株各指标之间均有相关性, 表明各性状之间相互影响、相互促进, 使得植株正常生长; 且气孔的大小、开闭都显著影响着植物叶片的 P_n 和 Tr 。以上结果表明, 三倍体满天星随着基因剂量的增加, 增强了三倍体满天星的光合作用能力及对光能的利用能力, 提高了三倍体满天星的叶绿素含量的积累。

关键词: 紫果西番莲满天星; 二倍体; 三倍体; 光合特性

Photosynthetic Characteristics of the Different Ploidy of *Passiflora edulis* Mantianxing

YANG Zhenxin, ZHU Yajing, LU Zhuangyue, LUO Xi, SU Xin, CHENG Sili,
CAI Nianhui, XU Yulan, WANG Dexin

(Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China Southwest Forestry University, Ministry of Education/Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, State Forestry Administration, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan)

Abstract: The growth, leaf morphology, chlorophyll synthesis and photosynthetic parameters in diploid and triploid *Passiflora edulis* Mantianxing were measured. The results showed that: (1) Compared with triploid plants, the triploid plants showed shorter stalk and petiole, narrower leaves and shorter distance between than that of diploid leaves, and the content of carotenoid was no significant difference. (2) The total content of chlorophyll, chlorophyll a and chlorophyll b synthesized by triploid leaves was higher in triploid. (3) During the diurnal process of photosynthesis, both diploid and triploid had a lunch break and the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (G_s) and intercellular CO_2 concentration (C_i) of triploid

收稿日期: 2023-04-04 修回日期: 2023-04-28 网络出版日期: 2023-07-14

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20230404001>

第一作者研究方向为林木遗传育种, E-mail: 15912102303@163.com

通信作者: 许玉兰, 研究方向为林木遗传育种, E-mail: xvyulan@163.com

王德新, 研究方向为林木遗传育种, E-mail: woshixin2007@126.com

基金项目: 云南省万人计划青年拔尖人才项目资助(YNWR-QNBJ-2019-075); 云南省研究生导师团队建设项目(2022-97); 西南林业大学科研基金项目(01108-18200133)

Foundation projects: Ten-Thousand Talent Plants for Young Top-notch Talents of Yunnan Province (YNWR-QNBJ-2019-075); Postgraduate Mentoring Team Building Project of Yunnan Province (2022-97); Southwest Forestry University Research Fund (01108-18200133)

plant were higher than those of diploid plant, which were increased by 9.5%, 6.9%, 4.5% and 3.9%, respectively. (4) The variation trend of monthly photosynthesis in diploid and triploid was similar, both reaching the highest value in August and falling to the lowest value in December, both of which are single-peak curves. The P_n , Tr and G_s of triploid Mantianxing are superior to diploid. (5) There was correlation between the indexes of the two ploidy plants, which indicated that the traits influenced and promoted each other to make the plant grow normally. The size, opening and closing of stomata significantly affected the P_n and Tr of plant leaves. These results showed that the photosynthetic capacity and light energy utilization capacity of triploid Mantianxing were enhanced with the increase of gene dose, and the accumulation of chlorophyll synthesis content of triploid Mantianxing was increased.

Key words: *P. edulis* Mantianxing; diploid; triploid; photosynthetic characteristics

紫果西番莲(*Passiflora edulis* Sims.)自身价值很高,果实可作为水果食用,具有独特且浓郁的香味,有“果汁之王”的美誉^[1]。此外,西番莲的根、茎、叶、花有消炎、止痛、活血强身、滋阴补肾、降脂降压等疗效,果内含有丰富的蛋白质、脂肪、还原糖、多种维生素和磷、钙、铁、钾等多达165种化合物以及人体必需的17种氨基酸,营养价值很高^[2-3]。而满天星较其他品种而言,适应能力更强,生长范围和栽植面积较广,病虫害较少,生长比较快,生活年限较长,经济价值高,应用前景十分广阔^[4]。

近年来西番莲种植业的生产经济效益大幅度增加,栽植区域面积也迅速扩大,但由于我国西番莲产业发展得较晚,种质资源仍相对缺乏,尤其缺乏品质优良、抗性尚好、产量较高的品种^[5]。西番莲生长后期枝条间相互缠绕,枝叶互相遮挡,生长面积和采光效率都低,通风透光差^[6],影响叶片的光合作用进而影响植株正常生长。而光合作用是植物最重要的生理现象,是植物生长发育的基础,为植物生长发育提供所需的物质和能量,直接关系到作物的产量和品质^[7]。叶绿素是光合作用中最重要的色素,它在光吸收和电子传递中具有重要的功能^[8],对植物的生长及农作物产量的形成具有极其重要的作用^[9]。染色体多倍化是植物进化最为重要的方式之一,植物细胞核内染色体组加倍以后,由于基因剂量倍增,常常带来一些形态和生理上的变化,在提高生长速度、增进遗传品质以及提高目的代谢物含量等方面具有优势^[10]。杨树、刺槐、桑树等一系列林木多倍体新品种的选育成功,为林木选育多倍体新品种提供了更广阔的研究方向^[11]。王茜龄等^[12]从多倍体桑树与二倍体桑树的光合性能研究中发现,多倍体桑树较二倍体桑树而言,不仅光合性能增强,产量、品质都有所提高。目前对紫果西番莲满天星的研究主要集中在种质资源性

状评价^[5]、多倍体诱导^[13]和多倍体叶绿素荧光分析研究^[14]等方面,尚无满天星多倍体的光合特性方面的报道。前期研究利用紫果西番莲满天星的成熟种子进行胚无菌萌发获得了满天星二倍体植株($2n=2x=18$),并通过胚乳培养法成功诱导获得了满天星三倍体植株($2n=3x=27$),形成了新物种的同时也为研究紫果西番莲满天星的长期进化提供了可能的原材料^[14]。本研究以紫果西番莲满天星二倍体及三倍体植株为材料,通过对生长量叶绿素含量和光合参数进行测定,探讨三倍体与二倍体植株光合特性的差异,旨在探明满天星染色体倍性以及植株生长、叶绿素含量与其光合作用之间的关系,为紫果西番莲满天星高光效育种提供进一步的理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

课题组前期利用紫果西番莲满天星成熟种子,通过胚无菌萌发获得的满天星二倍体($2n=2x=18$)植株,以及通过胚乳培养法成功诱导获得的三倍体植株($2n=3x=27$),紫果西番莲满天星的种子来自于云南省热带作物科学研究所的同一植株。

1.2 试验方法

1.2.1 材料种植 2021年5月将生根的无菌苗浸泡于0.1%多菌灵中10 min后移至8 L的塑料盆,盆规格为底径14.5 cm×上口径29 cm×高18.6 cm,塑料盆中基质为红土:腐殖土:珍珠岩=1:2:1,且经过0.5%高锰酸钾消毒。每盆栽植1株苗木,二倍体、三倍体各9株苗木。将盆栽苗放置于西南林业大学苗圃中,期间苗木统一管理,除草松土,适时浇水。西南林业大学苗圃位于102°45'41" E, 25°04'00" N,海拔1945 m,属北亚热带半湿润高原季风气候,年平均气温14.7℃、绝对最低温-9℃、绝对最高温32.5℃;年

降水量700~1100 mm,全年降水量在时间分布上,明显地分为干、湿两季,5~10月为雨季,降水量占全年的85%左右,11月至翌年4月为干季,降水量仅占全年的15%左右,年平均相对湿度68.2%。

1.2.2 性状调查 2021年7月-2021年12月,每月中早晨8:30-10:30进行生长量、叶绿素含量及月光合参数的测定。

生长量测定:采用皮尺和直尺(cm)及游标卡尺(mm)进行生长量测定,测量指标为苗高、地径、叶柄长、茎节、叶长、叶宽,每种倍性各测定3株苗木,每片叶片重复测定3次。其中叶长、叶宽及叶柄长选取植株的中上部成熟叶(从上往下的第3~7片)进行测量,叶形指数为叶长与叶宽之比^[15]。

叶绿素及类胡萝卜素含量测定:使用乙醇法测定叶绿素及类胡萝卜素含量,采取植株的中上部成熟叶(从上往下的第3~7片),称取剪碎的新鲜样品0.1 g,放入研钵中加入少量的95%乙醇和少量石英砂,研成均浆静置后,将溶液倒入加了滤纸的25 mL定容瓶中,用95%的乙醇冲洗进行定容。将叶绿体色素及类胡萝卜素提取液倒入光径为1 cm的比色杯中。以95%乙醇为空白对照,使用分光光度计测定吸光度,波长分别为663 nm、645 nm和470 nm。其中,叶绿素a含量(mg/g) = $(12.72 \times A_{663\text{nm}} - 2.59 \times A_{645\text{nm}}) V / (1000W)$; 叶绿素b含量(mg/g) = $(22.88 \times A_{645\text{nm}} - 4.67 \times A_{663\text{nm}}) V / (1000W)$; 叶绿素总含量(mg/g) = $(20.29 \times A_{645\text{nm}} + 8.05 \times A_{663\text{nm}}) V / (1000W)$; 类胡萝卜素含量(mg/g) = $(1000 + A_{470\text{nm}} - 3.27 \times \text{叶绿素a含量} - 104 \times \text{叶绿素b含量}) / 229$; W表示提取用的叶片鲜重; V表示提取液总体积(25mL)。

光合参数测定:使用LI-6800便捷式光合仪。二倍体和三倍体各选取3株植株进行测定,每株测定上部(第3~7片)长势稳定的3片叶片,每片叶片重复测定3次。测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)及胞间二氧化碳浓度(C_i)。除月光合参数的测定,在9月15日对叶片进行日光合速率测定,时间分别为9:00、11:00、13:00、15:00、17:00、19:00,光强分别为:900、900、1500、1300、500、50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

1.3 数据处理

采用Excel 2019对试验数据进行整理、统计,利用SPSS 21.0软件对二倍体和三倍体满天星的形态特征指标、叶绿素含量以及光合参数进行单因素方差分析,Tukey进行多重比较。采用Excel 2019作图,图表中数据皆为平均值 $\pm$ 标准误。采用Pearson

相关性分析不同指标间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 两种倍性紫果西番莲满天星形态特征比较

由表1可知,两种倍性满天星的苗高、地径和茎节随着时间的推移呈逐渐增长的趋势,且均从7月至10月之间的增长幅度较大,8月至9月的增长幅度最大,差异较为显著。7月和8月的三倍体满天星苗高均高于二倍体,而在9月份之后的二倍体均显著高于三倍体。二倍体满天星的地径均小于三倍体,而叶柄长则大于三倍体。7-9月三倍体满天星的茎节数量均多于二倍体,10-12月则少于二倍体。二倍体和三倍体满天星叶长的变化趋势基本一致,8月之后叶长都开始下降,体现出同一物种的叶长变化特性,8-10月时二倍体满天星的叶长大于三倍体,其他月份两种倍性间叶片长度三倍体较二倍体更长。两种倍性满天星的叶宽均体现出先增大后减小的趋势,二倍体满天星的叶宽大于三倍体。叶形指数越靠近1,则叶形越接近椭圆形,其观赏性越好^[15]。除12月外,其他月份二倍体满天星较三倍体的叶形指数更靠近1,表明二倍体的叶形更接近椭圆形,具有更高的观赏性。综合来看,三倍体满天星相较于二倍体呈现出矮壮、叶柄更短、叶片更窄和叶片之间的距离变短的现象,且三倍体叶形指数变化更为丰富。

2.2 两种倍性紫果西番莲满天星叶绿素含量比较

由图1可知,两种倍性满天星的叶绿素a含量均随着时间的推移逐渐减少。两种倍性的叶绿素b含量均呈现先下降后上升的趋势,二倍体的叶绿素b含量在10月和11月时含量最低,三倍体12月的叶绿素b含量显著高于其他月份,11月最低。二倍体满天星的叶绿素总含量呈现先下降后上升的趋势,7月显著高于其他月份,而三倍体则是先上升再下降又上升的趋势,7月和8月含量最高。三倍体满天星的叶绿素a、叶绿素b含量和叶绿素总含量在各月份均显著高于二倍体。两种倍性满天星的类胡萝卜素含量均呈先上升再下降的趋势,均在8月时含量最高,12月时含量显著低于其他月份。三倍体满天星的类胡萝卜素含量在8-11月时均高于二倍体;在8月两种倍性间有显著差异,其他月份无显著差异。综合来看,三倍体满天星的叶绿素含量高于二倍体,符合大部分多倍体植物叶绿素含量高的特性,说明三倍体满天星拥有更强的光合能力和吸收光能的能力。

表1 二倍体和三倍体紫果西番莲满天星形态特征差异

Table 1 Differences of morphological characteristics between diploid and triploid purple *P. edulis* Mantianxing

性状 Traits	倍性 Multiplicity	7月 July	8月 August	9月 September	10月 October	11月 November	12月 December
苗高(cm)SH	二倍体	4.9±0.62Bd	32.1±9.03Ac	159.3±3.72Ab	180.5±7.4Aab	189.6±9.33Aa	197.2±11.61Aa
	三倍体	8.8±0.58Ac	46.7±2.31Ad	140.5±3.64Bc	148.3±2.33Bb	154.0±3.06Bab	158.4±0.57Ba
地径(mm)D	二倍体	2.38±0.08Ac	5.46±0.61Ab	8.26±0.67Aa	9.62±1.08Aa	10.26±1.12Aa	10.04±0.93Aa
	三倍体	2.94±0.29Ac	5.54±0.15Ad	8.98±0.38Ac	10.33±0.32Ab	11.79±0.53Aa	11.54±0.48Aa
茎节T	二倍体	8±0.33Bd	14±0.67Bc	24±0Bb	30±0.67Aa	33±2.4Aa	34±2.73Aa
	三倍体	10±0.51Ab	16±0.33Ab	26±0.33Aa	28±3.00Aa	30±3.38Aa	32±4.10Aa
叶柄长(cm)PL	二倍体	1.29±0.12Ad	2.30±0.16Aab	2.45±0.11Aa	1.93±0.19Abc	1.88±0.2Abc	1.66±0.14Ac
	三倍体	1.21±0.06Aa	1.21±0.12Ba	1.37±0.13Ba	1.52±0.21Aa	1.62±0.44Aa	1.43±0.43Aa
叶长(cm)LL	二倍体	6.68±0.03Ac	12.65±0.56Aa	11.58±0.61Aa	9.49±0.07Ab	9.43±0.31Ab	7.49±0.29Ac
	三倍体	7.31±0.37Ab	11.4±0.29Aa	10.98±0.17Aab	8.95±0.41Aab	11.65±2.99Aa	8.46±0.95Aab
叶宽(cm)LW	二倍体	4.01±0.16Ad	7.90±0.45Ac	11.08±1.25Aa	10.11±0.56Aabc	10.47±0.47Aab	8.73±0.81Abc
	三倍体	3.79±0.15Ab	6.80±0.14Aa	8.33±0.38Aa	8.49±0.84Aa	8.52±0.9Aa	7.84±0.65Aa
叶形指数LSI	二倍体	1.67±0.07Ba	1.61±0.03Aa	1.07±0.11Ab	0.95±0.06Ab	0.90±0.06Ab	0.87±0.07Ab
	三倍体	1.94±0.08Aa	1.68±0.01Aab	1.32±0.05Aab	1.07±0.11Ab	1.44±0.47Aab	1.09±0.12Ab

不同大写字母表示各月份中两种倍性满天星在 $P < 0.01$ 水平下差异显著,不同小写字母表示各倍性满天星在月份间 $P < 0.05$ 水平下差异显著;下同

Different capital letters indicate that there is a significant difference between the two ploidy Mantianxing in each month at the level of $P < 0.01$, and different small letters indicate that there is a significant difference between the ploidy Mantianxing in each month at the level of $P < 0.05$; SH: Seedling height; D: Diameter; T: Tubercle; PL: Petiole length; LL: Leaf length; LW: Leaf width; LSI: Leaf shape index; The same as below

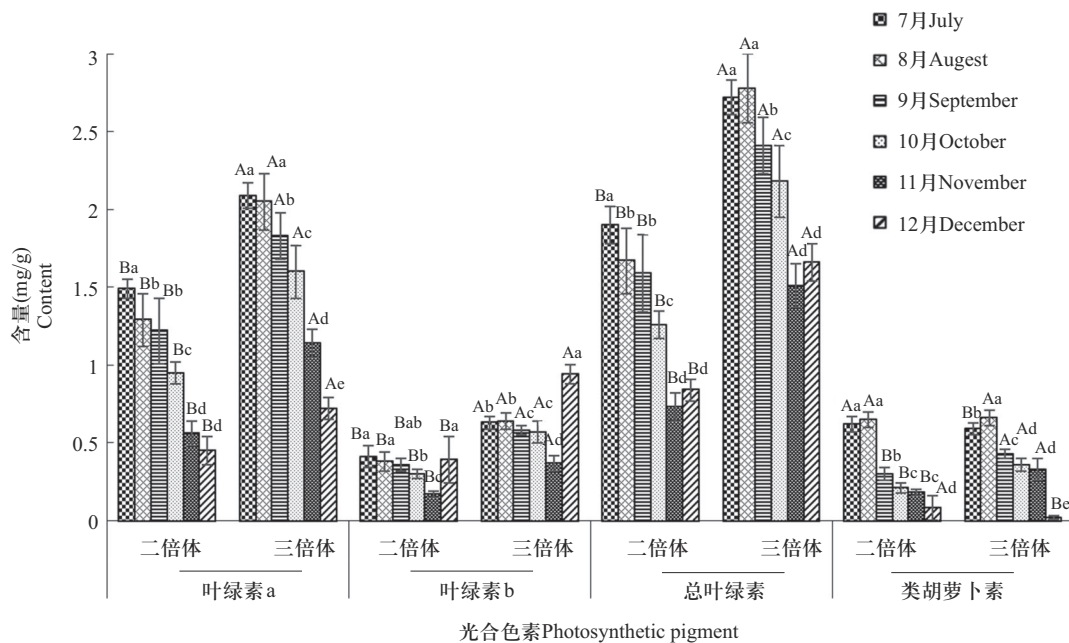


图1 二倍体和三倍体紫果西番莲满天星光合色素含量变化趋势图

Fig. 1 Variation trend of photosynthetic pigment content of diploid and triploid purple *P. edulis* Mantianxing

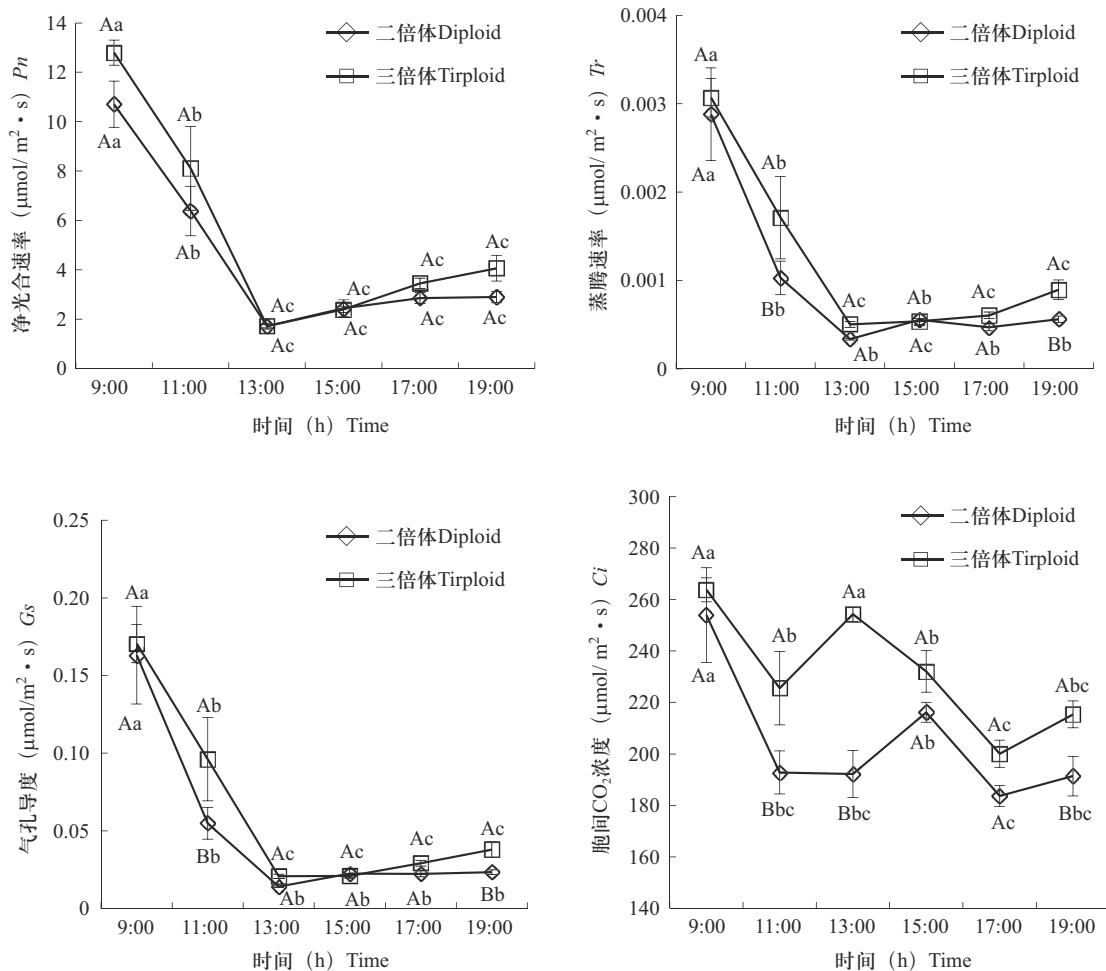
2.3 两种倍性紫果西番莲满天星光合作用比较

2.3.1 两种倍性紫果西番莲满天星光合参数日变化趋势 二倍体和三倍体紫果西番莲满天星的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度这3个性状具有相同的日变化趋势(图2),在测定时间内均呈现先下降后上升的趋势。早晨气孔开始张大,

光合作用逐渐增强,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO₂浓度均在9:00时达到峰值。三倍体最大净光合速率为12.80 μmol/ m²·s,二倍体为10.71 μmol/ m²·s,较二倍体提高了19.5%;三倍体最大蒸腾速率为0.0031 μmol/ m²·s,二倍体为0.0029 μmol/ m²·s,较二倍体提高了6.9%;三倍体

最大气孔导度为 $0.1705 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 二倍体为 $0.1631 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 三倍体较二倍体大 4.5%; 三倍体最大胞间 CO_2 浓度为 $264 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 二倍体为 $254 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 较二倍体提高了 3.9%。中午 13:00 时两个倍性的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降到最低点, 表现出明显的“午休”现象, 光照加强, 气温进一步升高, 引起相对空气湿度下降, 此时蒸腾失水强烈引起气孔关闭。二倍体和三倍体净光合速率、蒸腾速率和气孔导度的谷值差异不明显。二倍体和三倍体的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度在 13:00 和 15:00 时基本一致, 而在其

他时间三倍体均高于二倍体, 其中蒸腾速率和气孔导度在 19:00 时有显著差异。二倍体和三倍体的胞间 CO_2 浓度呈现 W 字形, 随着时间推移, 日照强度不断增大, 胞间 CO_2 浓度呈逐渐降低的趋势, 在 17:00 时下降至最低值, 随后逐渐升高。三倍体满天星的胞间 CO_2 浓度均高于二倍体, 其中在 13:00 时有显著差异。总体上看, 在相同环境条件下, 紫果西番莲满天星光合作用日进程中三倍体的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度均高于二倍体, 可见三倍体对光照具有很高的利用能力。



Pn: Net photosynthetic rate; Tr: Transpiration rate; Gs: Stomatal conductance; Ci: Intercellular carbon dioxide concentration; The same as below

图2 二倍体和三倍体紫果西番莲满天星净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度日变化趋势

Fig. 2 Diurnal variation trend of Pn, Tr, Gs and Ci of diploid and triploid *P. edulis* Mantianxing

2.3.2 两种倍性紫果西番莲满天星光合参数月变化趋势 二倍体和三倍体紫果西番莲满天星的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度这3个性状具有相同的月变化趋势(图3), 随着时间的推移均呈现先增加后下降的趋势, 均在8月份达到最高值, 12月份下降到最低点, 均为单峰曲线。在峰值8月时, 三

倍体 ($17.25 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) 满天星的净光合速率较二倍体 ($13.89 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) 提高了 24.2%, 且在 7-10 月、12 月, 三倍体始终显著高于二倍体。三倍体 8 月的蒸腾速率较 7 月升高了 94.44%, 二倍体 8 月较 7 月升高了 90.91%, 8 月三倍体的蒸腾速率较二倍体高 11.11%; 在 8 月和 10 月三倍体的蒸腾速率均显著高

于二倍体,其他月份两个倍性差异不明显。三倍体的气孔导度最高值为 $0.45 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$,最低值为 $0.019 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$,二倍体的气孔导度最高值为 $0.40 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$,最低值为 $0.020 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 。在12月,三倍体满天星的气孔导度较7月低了90.86%,二倍体满天星的气孔导度较7月低了89.56%。两个倍性满天星的胞间 CO_2 浓度随着月份的增加呈现增减反复的趋势,二倍体在12月时达到最高($348.92 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$),与光合速率相反,二倍体净光合速率在12月时最

小。胞间 CO_2 浓度可以反映光合速率与呼吸速率的关系,12月光强变小,此时达到最高值证明12月呼吸速率大于光合速率。当光强越强时胞间 CO_2 浓度会越小,但它与光合速率的关系并不是恒定的,如三倍体满天星的胞间 CO_2 浓度在8月时达到最高值($323.73 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$),说明8月光强的强度并没有大到抑制三倍体满天星呼吸速率的程度。倍性的增加使三倍体满天星拥有更强的光合能力,但其呼吸速率没有表现出更优的现象。

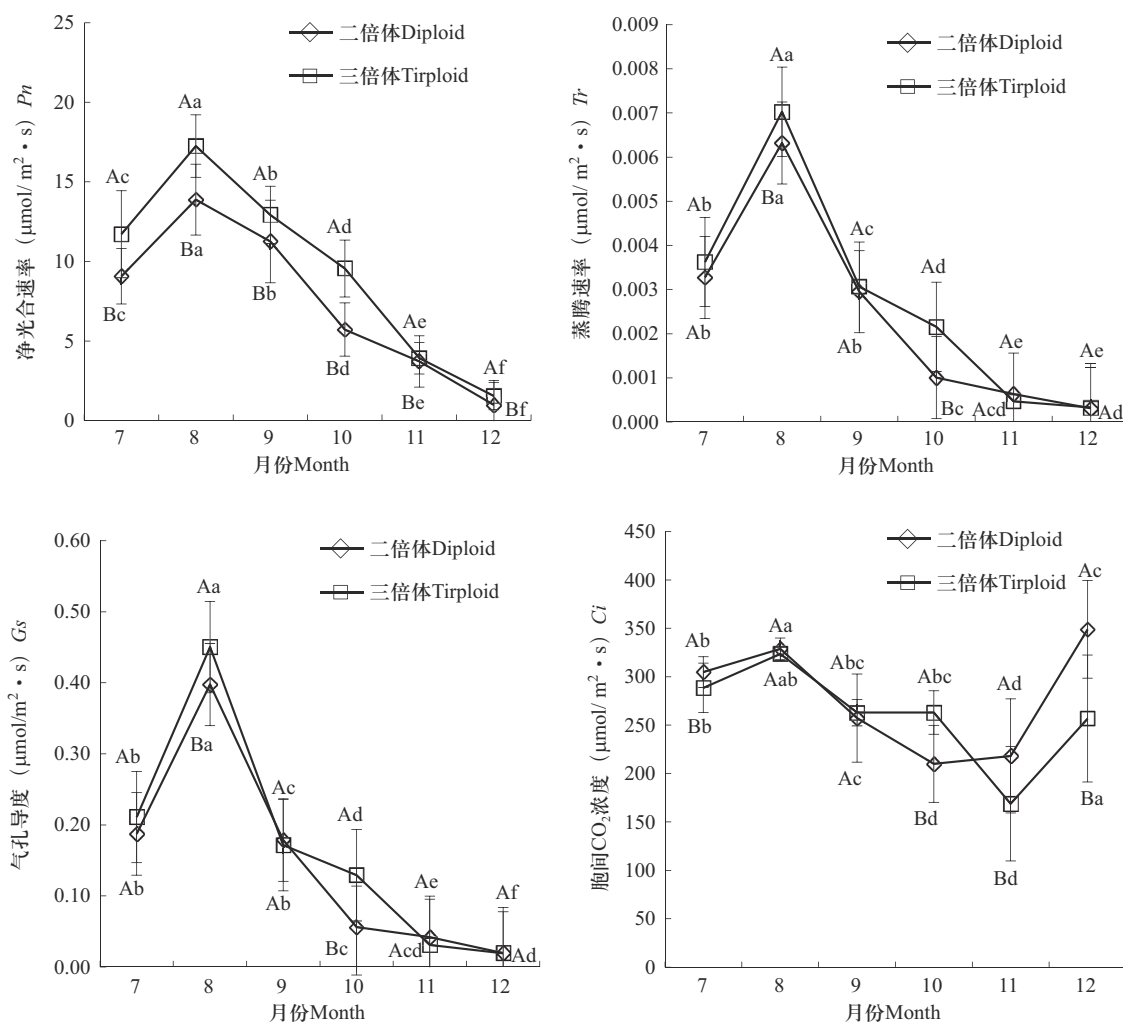


图3 二倍体和三倍体紫果西番莲满天星净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度月变化趋势

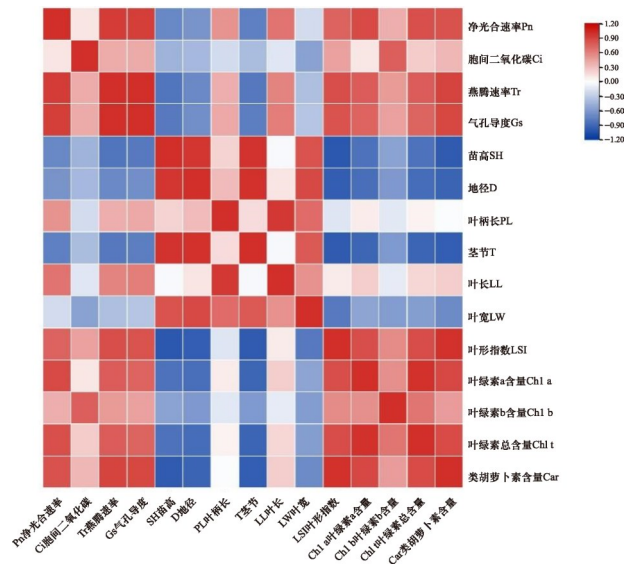
Fig. 3 Monthly variation trend of Pn, Tr, Gs and Ci of diploid and triploid *P. edulis* Mantianxing

2.4 两种倍性满天星形态、叶绿素与光合指标间的相关性分析

由图4和图5可看出,二倍体紫果西番莲满天星的苗高、地径、茎节、叶宽与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度之间呈负相关性,说明紫果西番莲满天星叶片光合能力的多少与苗木的粗壮、长高以及营养物质传输呈现负相关关系。叶柄长、叶长与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度之间

存在正相关关系,与胞间 CO_2 浓度呈负相关关系。叶形指数、叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量、类胡萝卜素含量与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度之间呈正相关关系。三倍体紫果西番莲满天星的苗高、地径、叶柄长、茎节、叶宽与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度之间呈负相关性,叶绿素b与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度之间呈负相关性,叶形指数、叶绿素a、叶绿素总

含量、类胡萝卜素含量与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度之间呈正相关关系,叶长与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度之间呈正相关关系。说明叶片光合能力为叶片扩张提供了必要的营养物质和物理膨压,而叶片的扩张也为光合作用拦截更多的光。



Chl a: Chlorophyll a content; Chl b: Chlorophyll b content; Chl t: Total chlorophyll content; Car: Carotenoids content; The same as below

图4 二倍体满天星相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of diploid Mantianxing

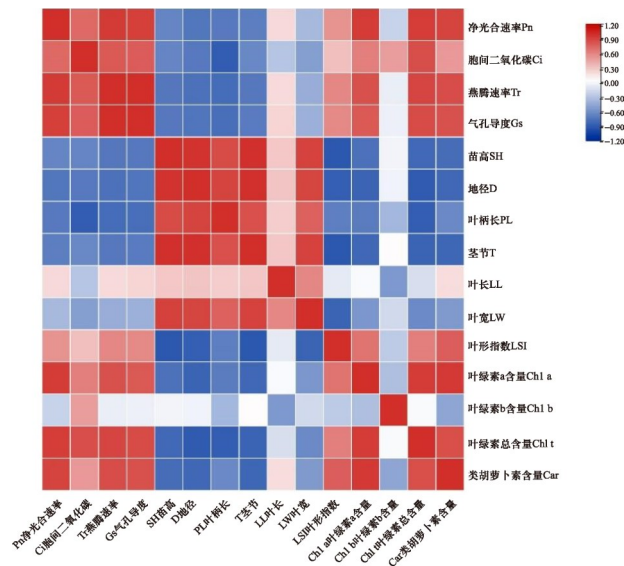


图5 三倍体满天星相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of triploid Mantianxing

同时,两个倍性的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度之间呈正相关关系,表明各性状之间相互影响、相互促进,使得植物能够正常生长,且

气孔的大小、开闭都显著影响着植物叶片的净光合速率和蒸腾速率。而三倍体的正相关性较二倍体要更显著,可见三倍体对光照具有很高的利用能力,以此储存的能量可用于植物的生长和繁殖扩展。

3 讨论

植物倍性的改变会给植物带来很多外部形态和内部结构的改变,一般来说多倍体植物较二倍体植物会有更大、更厚的叶片和更长的叶柄^[16]。植株在自身的树高、地径部分分配不同的资源去生长,树高与地径是最常用于对比植物表型变化的生长指标,能够直接反映苗木的生长状况^[17]。对二倍体和三倍体满天星的生长情况进行观测,发现二倍体满天星的苗高高于三倍体,地径小于三倍体,在7-9月三倍体的茎节数量显著高于二倍体,在10-12月两个倍性的茎节数量相似,与蒋卉等^[18]、Antoniazzi等^[13]的研究结果相似。叶部形态测定结果表明,满天星倍性改变后与大多数多倍体植株叶部形态的变化不一致,三倍体叶柄长度、叶长和叶宽在生长过程中大多数时间段均小于二倍体,满天星倍性的增加并未使叶片变大。这与刘美妍^[19]对黄瓜进行多倍体诱导技术的优化与种质创新的研究结果一致,三倍体黄瓜植株叶长无明显变化,叶宽减小,叶柄较二倍体变短了,表明倍性的增加导致的不同植物叶部形态的变化不是一致的。

叶绿素是光合作用中最重要的色素,叶绿素a、叶绿素b为主要的的光合色素,直接参与光合作用,对植物的生长及农作物产量的形成具有极其重要的作用^[11]。其含量的多少在一定程度上决定着光合速率的大小,与光合速率的衰减有密切关系^[20]。叶绿素还是光合作用的光敏催化剂,与光合作用密切相关,其含量和比例是植物适应和利用环境因子的重要指标^[21]。王茜龄等^[12]对桑树二倍体和四倍体进行光合特性研究,表明四倍体桑树叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量均高于二倍体桑树。与王茜龄等^[12]研究结果一致,本研究发现大多数时间段的三倍体叶绿素a、b、总含量及类胡萝卜素含量均比二倍体高,即表明三倍体的满天星吸收光能的范围较广,并可以更有效地进行光合作用。

在光合作用的日变化趋势中,植物光合速率的变化常表现为单峰或双峰的曲线,也就是常说的植物“午休”现象^[22]。而气孔是植物叶片与大气进行气体交换的通道,其闭合程度直接影响光合作用和蒸腾作用^[23]。在13:00时光强、温度达到最大值,此

时叶片的蒸腾速率也达到最大值,为了减少水分的散失,叶片将气孔关闭来阻断细胞与外界的气体交换,此时净光合速率将大幅降低^[24]。根据 Farquhar 等^[25]观点,只有当净光合速率和胞间 CO₂ 浓度变化方向相同,两者同时减小,且气孔限制值增大时,才可以认为光合速率的下降主要是由气孔导度引起的,否则光合速率的下降要归因于叶肉细胞羧化能力的降低。姜生秀等^[26]在对不同品种欧李的光合作用日进程研究中发现,不同品种欧李在 6、7 月份时净光合速率日变化均呈现双峰的曲线,而在 8、9 月份均呈现单峰的曲线,表明植物在一天中的光合作用变化情况随环境的变化而变化。本研究两个倍性满天星的光合“午休”现象是非气孔因素造成的,可能与光照和温度有关,这需要进一步研究。本研究在 9:00~11:00 时段中引起光合参数变化的主要因素是气孔因素,各指标之间的相关性分析发现,两个倍性的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度与净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度之间呈正相关关系,再一次证实该时段内,引起光合参数变化的主要因素是气孔因素。不同时间段中影响光合作用速率的因素有气孔因素和非气孔因素,出现两种影响因素的原因可能是:早晨光照强度较弱及植株水分充足,随着时间推移光照强度渐强,光合速率开始慢慢下降;而中午光照强度较强和土壤及植株自身水分散失,这时候引起光合速率降低的主要是非气孔因素,从而出现“午休”现象。

光合作用与植物生长具有密切关系^[27],是植物体内极为重要的代谢过程,它的强弱对于植物的生长、发育和抗逆性都有十分重要的影响^[28-29]。相关性分析表明,两个倍性满天星植株的生长变化、叶片形态变化及叶片叶绿素含量均与光合参数有正相关关系,也有负相关关系。这也证实了植物生长发育离不开光合作用的加持。光是影响植物光合作用的重要因子,不同月份下光强的变化对植物光合特性有较大的影响^[30]。桂琴等^[31]通过林下生境对大叶丹参叶表型及光合特性的影响分析,同样得出光合参数与叶绿素含量具有相关性。本研究中,不同月份,不同倍性的光合参数变化较大。7、8、9、10、12 月三倍体满天星的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度也始终高于二倍体,这证实了三倍体满天星较二倍体有更强的光合能力,累积的同化产物更多,这也揭示了三倍体满天星具有巨大性的原因。因此,说明紫果西番莲满天星的速生季节在 8 月份,

且三倍体满天星的光合速率较二倍体植株快,总体上三倍体比二倍体植株优良。

4 结论

与二倍体紫果西番莲满天星相比,三倍体植株表现出苗高更矮、地径更粗的特点,以及同一位置的叶片更短、叶片更窄、叶柄长更短、茎节较短粗的特征。三倍体的叶片叶绿素含量较二倍体更多。叶片光合日变化和月变化方面,在中午 13:00 时两个倍性均表现出明显的“午休”现象,非气孔因素是导致“午休”的主要原因,而在早晨随着光照强度渐强和温度升高,净光合速率下降是因为气孔因素引起的;三倍体的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度均高于二倍体。综上可知,三倍体具有比二倍体更强的光能利用力和光合响应机制,三倍体满天星拥有更强的光合能力,以此储存的能量可用于植物的生长和繁殖扩展,是其生长迅速、生产力高及蔓延性强的一个重要生理基础。

参考文献

- [1] 唐明荣,唐少东,严兴康,伍国银,盘建军.西番莲紫香 1 号特征特性及高产栽培技术.中国农技推广,2018,34(3): 45-46
Tang M R, Tang S D, Yan X K, Wu G Y, Pan J J. Characteristics and high-yielding cultivation techniques of *Passiflora purpurea* No. 1. China Agricultural Technology Extension, 2018, 34(3): 45-46
- [2] 陈惠芳.植物药数据库.国外医药(植物药分册),2005(6): 270-273
Chen H F. Botanicals database. Foreign Medicine (Botanicals Fascicle), 2005(6): 270-273
- [3] Janzanti N S, Macoris M S, Garruti D S, Monteiro M. Influence of the cultivation system in the aroma of the volatile compounds and total antioxidant activity of passion fruit. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(2): 511-518
- [4] 韦晓霞,潘少霖,陈文光,叶新福,吴如健.百香果等 6 种西番莲属植物抗寒性调查.中国南方果树,2019,48(1): 53-55
Wei X X, Pan S L, Chen W G, Ye X F, Wu R J. Investigation of cold resistance of *Passiflora edulis* and other six *Passiflora* species. South China Fruits, 2019, 48(1): 53-55
- [5] 章希娟,许玲,魏秀清,许家辉.5 份西番莲种质资源性状评价.东南园艺,2017,5(6): 5-8
Zhang X J, Xu L, Wei X Q, Xu J H. Characters evaluation of five Passion fruit germplasms. Southeast Horticulture, 2017, 5(6): 5-8
- [6] 赖瑞云,林建忠,张雪芹,林丽霞,钟赞华,谢志南.西番莲不同冠层叶片叶绿素荧光特性比较.中国果树,2022(3): 50-53,73

- Lai R Y, Lin J Z, Zhang X Q, Lin L X, Zhong Z H, Xie Z N. Comparison of chlorophyll fluorescence characteristics of different canopy leaves of *Passiflora edulis*. China Fruits, 2022 (3): 50-53, 73
- [7] 杨志晓, 丁燕芳, 张小全, 薛刚, 王轶, 任学良, 任周营, 杨铁钊. 赤星病胁迫对不同抗性烟草品种光合作用和叶绿素荧光特性的影响. 生态学报, 2015, 35(12): 4146-4154
- Yang Z X, Ding Y F, Zhang X Q, Xue G, Wang Y, Ren X L, Ren Z Y, Yang T Z. Impacts of *Alternaria alternata* stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence in two tobacco cultivars with different resistances. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4146-4154
- [8] 王亚玲, 李小寒, 宫方林, 梁佳佳, 李金华. 一个新的番茄黄绿叶突变体表型鉴定与遗传分析. 植物遗传资源学报, 2019, 20(1): 215-220
- Wang Y L, Li X H, Gong F L, Liang J J, Li J H. Phenotypic identification and genetic analysis of a novel tomato yellow green leaf mutant. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(1): 215-220
- [9] 江莹芬, 吴新杰, 费维新, 李强生, 荣松柏, 初明光, 陈凤祥. 甘蓝型油菜角果特异白化种质的遗传和生理特性. 植物遗传资源学报, 2020, 21(1): 113-120
- Jiang Y F, Wu X J, Fei W X, Li Q S, Rong S P, Chu M G, Chen F X. Genetic and physiological characteristics of *Brassica napus* germplasm resources showing albino siliqua. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(1): 113-120
- [10] 杜琳, 李永存, 穆怀志, 张添咏, 刘菲菲, 黄海娇, 刘桂丰. 四倍体与二倍体白桦的光合特性比较. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 1-4
- Du L, Li Y C, Mu H Z, Zhang T Y, Liu F F, Huang H J, Liu G F. Photosynthetic characteristics of tetraploid and diploid *Betula platyphylla*. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(2): 1-4
- [11] 郑彩霞, 张志毅. 白杨染色体加倍技术研究及三倍体育种(IV)——加倍体白杨生理特性的初步研究. 北京林业大学学报, 1994(2): 19-25
- Zheng C X, Zhang Z Y. Research on chromosome doubling techniques and triploid breeding in *Sect. Populus* (IV) - Preliminary studies on the physiological characteristics of doubled *Sect. Populus*. Journal of Beijing Forestry University, 1994(2): 19-25
- [12] 王茜龄, 余茂德, 鲁成, 吴存容, 敬成俊. 果叶兼用多倍体新桑品种的选育及其光合特性研究. 中国农业科学, 2011, 44(3): 562-569
- Wang X L, Yu M D, Lu C, Wu C R, Jing C J. Study on breeding and photosynthetic characteristics of new polyploidy variety for leaf and fruit-producing mulberry (*Morus* L.). Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(3): 562-569
- [13] Antoniazzi C A, Faria R B, Carvalho P P, Mikovski A I, Carvalho I F, Matos E M, Reis A C, Viccini L F, Pinto D L P, Rocha I, Otoni W C, Silva M L. In vitro regeneration of triploid plants from mature endosperm culture of commercial passionfruit (*Passiflora edulis* Sims). Scientia Horticulturae, 2018, 238: 408-415
- [14] 王雪, 朱雅静, 陈诗, 杨振欣, 罗茜, 许玉兰, 王德新, 蔡年辉. 不同倍性紫果西番莲“满天星”形态、叶绿素及荧光参数差异比较. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2022, 53(5): 755-762
- Wang X, Zhu Y J, Chen S, Yang Z X, Luo X, Xu Y L, Wang D X, Cai N H. Comparison of morphology, chlorophyll and chlorophyll fluorescence parameters of *Passiflora edulis* with different ploidy. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2022, 53(5): 755-762
- [15] 洪陈洁, 林晗, 洪伟, 王珉, 洪滔. 不同品系福建山樱花叶功能性状研究. 热带亚热带植物学报, 2015, 23(2): 191-196
- Hong C J, Lin H, Hong W, Wang M, Hong T. Leaf functional characteristics in different strains of *Prunus campanulate*. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2015, 23(2): 191-196
- [16] 赵奉彬, 尚策, 张莉梅, 张志翔. 11种杨属植物的倍性鉴定及山杨天然三倍体的发现. 东北林业大学学报, 2016, 44(6): 23-27
- Zhao F B, Shang C, Zhang L M, Zhang Z X. Ploidy testing of 11 poplar species and discovery of natural triploid *Populus davidiana* dode. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(6): 23-27
- [17] McConaughay K D M, Coleman J S. Biomass allocation in plants: Ontogeny or optimality? A test along three resource gradients. Ecology, 1999, 80(8): 2581-2593
- [18] 蒋卉, 袁欣, 冯乃馨, 张晶, 李艳敏, 符真珠, 高杰, 董晓宇, 王慧娟, 王利民, 张和臣. 矮牵牛同源多倍体诱导及其初期表型差异分析. 河南农业科学, 2019, 48(9): 111-116
- Jiang H, Yuan X, Feng N X, Zhang J, Li Y M, Fu Z Z, Gao J, Dong X Y, Wang H J, Wang L M, Zhang H C. Analysis of polyploidy induction and initial phenotype difference in *Petunia axillaris*. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 48(9): 111-116
- [19] 刘美妍. 黄瓜多倍体诱导技术的优化与种质创制. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021
- Liu M Y. Optimization of polyploid induction technology and germplasm creation of cucumber. Qianhuangdao: Hebei Science and Technology Teachers' College, 2021
- [20] 王峰, 刘志兵, 燕丽萍, 孙忠奎, 程甜甜, 杨波, 张林. 不同倍性青檀光合特性研究. 中国农学通报, 2018, 34(28): 26-30
- Wang F, Liu Z B, Yan L P, Sun Z K, Chen T T, Yang B, Zhang L. Photosynthetic characteristics of different ploidy varieties of *Pteroceltis tatarinowii*. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(28): 26-30
- [21] 刘悦秋, 孙向阳, 王勇, 刘音. 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响. 生态学报, 2007, 27(8): 3457-3464
- Liu Y Q, Sun X Y, Wang Y, Liu Y. Effects of shades on photosynthetic properties characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Urtica dioica*. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(8): 3457-3464

- [22] 田大伦, 罗勇, 项文化, 闫文德. 樟树幼树光合特性及其对 CO_2 浓度和温度升高的响应. 林业科学, 2004, 40(5): 88-92
Tian D L, Luo Y, Xiang W H, Yan W D. Photosynthetic characteristics of *Cinnamomum camphora* and its response to elevation of CO_2 and temperature. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(5): 88-92
- [23] 赵广琦, 张利权, 梁霞. 芦苇与入侵植物互花米草的光合特性比较. 生态学报, 2005, 25(7): 1604-1611
Zhao G Q, Zhang L Q, Liang X. A comparison of photosynthetic characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and an indigenous plant *Phragmites australis*. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1604-1611
- [24] 邵玺文, 韩梅, 韩忠明, 孔伟伟, 杨利民. 不同生境条件下黄芩光合日变化与环境因子的关系. 生态学报, 2009, 29(3): 1470-1477
Shao X W, Han M, Han Z M, Kong W W, Yang L M. Relationship between diurnal changes of photosynthesis of *Scutellaria baicalensis* and environmental factors in different habitats. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1470-1477
- [25] Farquhar G D, Sharkey T D, Imai K, Cowan I R. A direct confirmation of the standard method of estimating intercellular partial pressure of CO_2 . Plant Physiology, 1982, 69(3): 657-659
- [26] 姜生秀, 严子柱. 不同欧李幼苗品种光合特性比较. 华北农学报, 2020, 35(6): 122-132
Jiang S X, Yan Z Z. The Comparative research on photosynthetic characteristics of different *Cerasus humilis* seedling varieties. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2020, 35(6): 122-132
- [27] 穆怀志, 林琳, 于建国, 李爽, 姜效龙, 夏富才. NaHCO_3 胁迫下四倍体白桦苗木光合特性分析. 北华大学学报: 自然科学版, 2017, 18(1): 25-29
Mu H Z, Lin L, Yu J G, Li S, Jiang X L, Xia F C. Photosynthesis of autotetraploid *Betula platyphylla* seedling responding to NaHCO_3 stress. Journal of Beihua University: Natural Science, 2017, 18(1): 25-29
- [28] 刘厚诚, 陈细明, 陈日远, 宋世威, 孙光闻. 缺镁对菜薹光合作用特性的影响. 园艺学报, 2006, 33(2): 311-316
Liu H C, Chen X M, Chen R Y, Song S W, Sun G W. Effects of magnesium deficiency on photosynthetic characteristics of flowering Chinese Cabbage. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(2): 311-316
- [29] 于永畅, 王厚新, 李承秀, 孙忠奎, 牛田, 孙芳, 王长宪, 张林. 四倍体与二倍体紫薇光合特性研究. 中国农学通报, 2013, 29(22): 10-14
Yu Y C, Wang H X, Li C X, Sun Z K, Niu T, Sun F, Wang C X, Zhang L. Study on photosynthetic characteristics of tetraploid and diploid *Lagerstroemia indica* L.. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(22): 10-14
- [30] 王强, 金则新, 郭水良, 管铭, 王兴龙. 濒危植物长叶榧的光合生理生态特性. 生态学报, 2014, 34(22): 6460-6470
Wang Q, Jin Z X, Guo S L, Guang M, Wang X L. Photosynthetic traits of the endangered plant species *Torreya jackii*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6460-6470
- [31] 桂琴, 郭其强, 袁刚毅, 张亚琴, 罗丝琼, 谢娜. 林下生境对大叶丹参叶表型及光合特性的影响. 森林与环境学报, 2023, 43(2): 185-193
Gui Q, Guo Q Q, Yuan G Y, Zhang Y Q, Luo S Q, Xie N. Effects of understory habitats on the leaf phenotype and photosynthesis characteristics of *Salvia miltiorrhiza*. Journal of Forest and Environment, 2023, 43(2): 185-193