

# 降水量和降水间隔时间对树番茄幼苗生长及光合荧光特性的影响

曾惠平, 孙丽娟, 茶晓飞, 郭焕仙, 李兴则, 董琼<sup>①</sup>

(西南林业大学林学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 采用双因素完全随机区组试验, 设置自然降水量(W)为对照, 降水量减少40%(W<sub>-</sub>)和降水量增加40%(W<sub>+</sub>)为处理; 设置自然降水间隔时间(T)为对照, 延长降水间隔时间(T<sub>+</sub>)为处理。分析降水量和降水间隔时间对树番茄[*Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendth.]幼苗的株高、地径、干质量、叶绿素含量、光合参数和荧光参数的影响。结果显示: 增加降水量, 树番茄幼苗株高、地径的增长量均增加, 根、茎、叶的干质量和总干质量基本上均在自然降水量处理下积累最多, 且延长降水间隔时间后, 幼苗株高、地径的增长量基本上均有所增加。同一降水间隔时间处理下, 叶片叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素的含量在自然降水量处理下最大, 自然降水间隔时间处理下叶绿素a含量与叶绿素b含量的比值(Chla/Chlb)较大。增加降水量, 叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)均升高。增加降水量, 初始荧光(F<sub>o</sub>)降低, 最大荧光(F<sub>m</sub>)、可变荧光(F<sub>v</sub>)、PS II最大光化学效率(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)、PS II潜在活性(F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>)增加, 且F<sub>m</sub>、F<sub>v</sub>、F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>、F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>值在增加降水量、延长降水间隔时间处理保持较高水平。相关性和主成分分析结果显示: 树番茄幼苗大部分生长和光合荧光参数间有显著(P<0.05)或极显著(P<0.01)相关性, Chla/Chlb和F<sub>o</sub>值与其他参数均具有负相关关系, 除Chla/Chlb和F<sub>o</sub>值外, 其他参数间均具有正相关关系。综合研究结果表明: 树番茄幼苗在不同降水量和降水间隔时间下进行了一系列适应性调节, 树番茄幼苗光合作用与植物生长具有紧密联系, 光合作用增强将促进树番茄幼苗生长、干物质积累。增加降水量、延长降水间隔时间有利于树番茄幼苗生长和光合作用, 其中增加降水量的影响效果更明显。

**关键词:** 树番茄; 降水量; 降水间隔时间; 生长; 光合荧光特性

中图分类号: Q945.79; Q948.112; S663.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)05-0078-11  
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.05.08

**Effects of precipitation and precipitation interval on growth and photosynthetic fluorescence characteristics of *Cyphomandra betacea* seedlings** ZENG Huiping, SUN Lijuan, CHA Xiaofei, GUO Huanxian, LI Xingze, DONG Qiong<sup>①</sup> (College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(5): 78-88

**Abstract:** A two-way completely randomized block experiment was employed, natural precipitation (W) was set as the control, and 40% reduction in precipitation (W<sub>-</sub>) and 40% increase in precipitation (W<sub>+</sub>) were set as the treatments; natural precipitation interval (T) was set as the control, and extended precipitation interval (T<sub>+</sub>) was set as the treatment. The effects of precipitation and precipitation interval on the plant height, ground diameter, dry mass, chlorophyll content, photosynthetic parameters, and fluorescence parameters of *Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendth. seedlings were analyzed. The results show that with the increase of precipitation, the increments in plant height and ground diameter of *C. betacea* seedlings increase, the dry masses of roots, stems, and leaves and total dry mass are the most accumulated

收稿日期: 2024-09-12

基金项目: 云南省三区人才项目(990022125); 西南林业大学基金项目(110824057)

作者简介: 曾惠平(2000—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事经济林果树栽培及石漠化治理的研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: dqyeam@swfu.edu.cn

引用格式: 曾惠平, 孙丽娟, 茶晓飞, 等. 降水量和降水间隔时间对树番茄幼苗生长及光合荧光特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(5): 78-88.

under natural precipitation treatment in general, and after extending the precipitation interval, the increments in plant height and ground diameter of the seedlings increase in general. Under the same precipitation interval treatment, the contents of chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, and total chlorophyll of the leaves are the highest under natural precipitation treatment, and the ratio of chlorophyll *a* content to chlorophyll *b* content (Chl*a*/Chl*b*) is relatively high under natural precipitation interval treatment. With the increase of precipitation, the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), intercellular CO<sub>2</sub> concentration (Ci), and transpiration rate (Tr) of the leaves all increase. With the increase of precipitation, the initial fluorescence ( $F_o$ ) decreases, while the maximum fluorescence ( $F_m$ ), variable fluorescence ( $F_v$ ), maximum photochemical efficiency of PSII ( $F_v/F_m$ ), and potential activity of PSII ( $F_v/F_o$ ) increase, and the values of  $F_m$ ,  $F_v$ ,  $F_v/F_m$ , and  $F_v/F_o$  remain at relative high levels under increased precipitation and extended precipitation interval treatments. The correlation and principal component analysis results show that there are significant ( $P < 0.05$ ) or extremely significant ( $P < 0.01$ ) correlations between most growth and photosynthetic fluorescence parameters of *C. betacea* seedlings, Chl*a*/Chl*b* and  $F_o$  values are negatively correlated with the other parameters, while all the other parameters are positively correlated with each other except for Chl*a*/Chl*b* and  $F_o$  values. The comprehensive research results indicate that *C. betacea* seedlings undergo a series of adaptive adjustments under different precipitation and precipitation intervals, the photosynthesis of *C. betacea* seedlings is closely associated with plant growth, and enhanced photosynthesis promotes the growth and dry matter accumulation of *C. betacea* seedlings. Increased precipitation and extended precipitation intervals are beneficial for the growth and photosynthesis of *C. betacea* seedlings, among which the effect of increased precipitation is more evident.

**Key words:** *Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendtn.; precipitation; precipitation interval; growth; photosynthetic fluorescence characteristics

树番茄[*Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendtn.]为茄科(Solanaceae)树番茄属(*Cyphomandra* Sendtn.)小乔木或灌木,其果实质量优于普通番茄(*Solanum lycopersicum* Linn.)且营养物质丰富<sup>[1]</sup>。在云南,树番茄仅种植在腾冲、西双版纳、红河等降水量少的地区,而昆明、文山、曲靖等较湿润地区的树番茄产量较少<sup>[2]</sup>。说明降水在一定程度上影响了树番茄的生长。在全球气候变化形势下,自然降水量和降水频率的改变会影响陆地生态系统<sup>[3]</sup>,降水量和降水频率减少会使植物出现短暂周期性的土壤水分缺失<sup>[4]</sup>,而土壤水分影响许多过程和生命周期,如土壤微生物对物质的分解和转化等<sup>[5]</sup>,继而影响土壤肥力和生产力,最终影响植物的生理生化过程。因此,土壤含水量需在一定适宜的范围才能促进植物生长。

植物生长发育受到生物量积累的影响,而光合作用是植物营养物质的主要来源,也是植物最易受非生物胁迫影响的生理活动之一<sup>[6]</sup>。当降水改变时,植物生物量和光合过程也会发生变化。包玉等<sup>[7]</sup>发现,降水量减少导致植物生物量积累显著降低。董丽佳等<sup>[8]</sup>指出适当增水将促进辽东栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.)幼苗生长。对不同年降水量站点冬青栎(*Quercus ilex* Linn.)的研究结果表明:在降水量充沛站点的气孔导度无显著差异,而随着叶

片水势下降,最湿地区种群的气孔导度下降幅度以及生长速率和株高高于干燥地区<sup>[9]</sup>。在降水量0~20 mm范围内榆树(*Ulmus pumila* Linn.)幼苗净光合速率、气孔导度和蒸腾速率随降水量的增加显著升高,表明在土壤水分充足的情况下可以避免榆树幼苗的气孔受限,然而,当降水量超过20 mm时,净光合速率变化不大,说明降水量超过20 mm对榆树光合作用没有显著影响<sup>[10]</sup>。叶绿素在植物光合作用的光吸收中发挥主要作用<sup>[11]</sup>。叶绿素荧光能反映植物在逆境环境下的光合生理特性,常被用作光合作用的光系统探针<sup>[12-13]</sup>。对喀斯特地区红背山麻秆[*Alchornea trewioides* (Benth.) Müll. Arg.]荧光参数的研究结果显示:初始荧光产量随降水的减少显著增大,而最大荧光产量、PS II潜在活性、PS II最大光化学效率随降水的减少逐渐减小<sup>[14]</sup>。也有研究结果表明:侧柏[*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco]幼苗PS II最大光化学效率随降水的减少呈下降趋势<sup>[15]</sup>。荧光参数的变化反映了植物光合作用的变化,在不同降水量和降水间隔时间下,研究植物的荧光参数变化有利于了解其光合机构的变化,对其在不同环境条件下物质积累具有重要意义。

目前,国内学者对于树番茄的研究主要集中在养分积累对光照的响应<sup>[16]</sup>,生长发育对肥料的响

应<sup>[17]</sup>,种子、幼苗对镉的适应性<sup>[18]</sup>等。而有关树番茄幼苗生长及光合荧光特性对降水量和降水间隔时间的响应尚未见报道。针对目前国内树番茄种植较少,且受气候条件影响大,尤其是降水量对其生长发育和产量影响较大的情况,本研究以株龄1 a的树番茄幼苗为材料,分析不同降水量及降水间隔时间对幼苗生长及光合荧光参数的影响,旨在明确不同降水量及降水间隔时间下的幼苗生长规律,为树番茄幼苗合理栽培、水分管理及推广种植提供一定参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试材料为株龄1 a的树番茄幼苗。2022年4月初从云南省保山市树番茄分布区(北纬24°07'~24°50'、东经98°25'~99°11')采集株龄3 a、处于盛果期的树番茄果实50~100个,带回实验室剥出种子,风干后去除畸形不饱满的种子,而后进行穴盘(长540 mm、宽280 mm、高50 mm)播种育苗,红土、草炭、蛭石、珍珠岩按体积比1:1:1:1混匀后作为栽培基质,每穴1粒播至穴盘1 cm深处。2022年10月,选取长势、高度、大小基本一致的幼苗(平均苗高21.06 cm,平均地径4.03 mm)移植于上口口径20 cm、下口径14 cm、高18 cm的花盆内,花盆内覆栽培基质(红土、腐殖土和珍珠岩按体积比5:3:2混匀)至深15 cm左右,每盆1株,共移植324盆;供试栽培基质容重 $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、总氮含量 $0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总磷含量 $0.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总钾含量 $2.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总钙含量 $0.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、镁含量 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、铁含量 $60.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 5.45。供试幼苗在西南林业大学格林温室(北纬25°03'、东经102°45')适应生长50 d,期间持续浇灌,控制土壤相对含水量在40%左右,大棚上方设遮阳网,于2023年4月至7月(树番茄生长季)进行模拟降水实验。温室光照充足,海拔1 904 m,温度20~35 °C,空气相对湿度23%~67%,大气CO<sub>2</sub>浓度400~412  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。红土为温室内地皮下50 cm的砖红壤,草炭、蛭石、腐殖土和珍珠岩购于昆明市斗南花卉市场。

### 1.2 方法

1.2.1 实验设计 实验采用降水量和降水间隔时间双因素随机区组实验(表1)。根据中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)昆明历史年降水量数据集以

及段燕楠等<sup>[19]</sup>和李宝芬等<sup>[20]</sup>的结果,在实际月平均降水量( $W_0$ )的基础上设置模拟降水量水平,以自然降水量( $W$ )为对照,降水量减少40%( $W_-$ )和降水量增加40%( $W_+$ )为处理,以自然降水间隔时间(降水间隔时间3 d)( $T$ )为对照,延长降水间隔时间(降水间隔时间6 d)( $T_+$ )为处理。根据文献[21]中的方法计算模拟的自然降水量,计算公式为 $W = W_0 \times A \times 1\,000$ ,式中, $A$ 为花盆开口面积,并进一步计算 $W_-$ 和 $W_+$ 组的降水量。模拟降水使用量筒和烧杯,在20:00—22:00内将相应水量在幼苗基部贴近盆栽覆土表面缓慢均匀洒入花盆中,以控制空气湿度的影响,防止水分蒸发。共6个处理,每个处理3个小区,每小区18株幼苗,共324株。

#### 1.2.2 指标测定

1.2.2.1 株高及地径测量 在降水实验前,采用直尺(精确度0.1 cm)测量株高(花盆上口覆土表面至树番茄主茎顶部的垂直距离);使用游标卡尺(精度0.01 mm)测量地径(花盆上口覆土表面处树番茄的直径)。实验结束后,再次测量株高和地径。2次测量结果之差即为株高增长量和地径增长量。

1.2.2.2 干质量测量 实验结束后,每个处理随机选取3株长势一致的幼苗,分为根、茎、叶,分别装入信封袋后放入60 °C烘箱干燥至恒质量,采用万分之一电子天平称量根、茎、叶干质量,结果取平均值。三者之和为总干质量。

1.2.2.3 叶绿素含量测定 实验结束后,每个处理随机选取3株长势一致的幼苗,随机选取新鲜叶片

表1 双因素随机区组实验的降水设置<sup>1)</sup>

Table 1 Precipitation settings in the two-factor randomized block experiment<sup>1)</sup>

月份 Month	P1/mm	t/d	P2/mL		
			W	W <sub>-</sub>	W <sub>+</sub>
4月 April	25.41	3	80	48	112
		6	160	96	224
5月 May	20.34	3	64	38	90
		6	128	76	180
6月 June	146.76	3	461	277	645
		6	922	554	1 290
7月 July	150.06	3	471	283	659
		6	942	566	1 318

<sup>1)</sup> P1: 实际月平均降水量 Actual average monthly precipitation; t: 模拟降水间隔时间 Simulated precipitation interval; P2: 模拟月平均降水量 Simulated average monthly precipitation; W: 自然降水量 Natural precipitation; W<sub>-</sub>: 降水量减少40% 40% reduction in precipitation; W<sub>+</sub>: 降水量增加40% 40% increase in precipitation.

0.2~0.5 g,采用乙醇浸提法<sup>[22]</sup>,使用UV-1900i紫外分光光度计(日本Shimadzu公司)分别在波长665、649 nm下测定吸光度,计算叶绿素a含量、叶绿素b含量、总叶绿素含量(叶绿素a含量与叶绿素b含量之和)及叶绿素a含量与叶绿素b含量的比值(Chla/Chlb)。重复测定3次,结果取平均值。

1.2.2.4 光合参数测定 实验结束后,在晴天9:30—11:30,每个处理组随机选取3株长势一致的幼苗,从顶芽开始向下第4枚至第6枚叶片中挑选2枚健康、鲜绿的叶片,使用LI-6800便携式光合测定仪(美国LI-COR公司)进行净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)测定;并计算水分利用效率(WUE),计算公式为WUE=Pn/Tr。每枚叶片重复测定3次(每次读取10个值),结果取平均值。

1.2.2.5 荧光参数测定 实验结束后,每个处理组随机选取3株长势一致的幼苗,从顶芽开始向下第4枚至第6枚叶片中选2枚健康、鲜绿叶片。使用PEA-Plus高速连续激发式荧光仪(英国Hansatech公司)测定叶绿素荧光参数。测定前先将叶片进行30 min暗处理,记录初始荧光(F<sub>0</sub>)、最大荧光(F<sub>m</sub>)、可变荧光(F<sub>v</sub>)、PS II最大光化学效率(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)和PS II潜在活性(F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub>)。重复测定3次,结果取平均值。

### 1.3 数据处理和分析

使用EXCEL 2016软件进行数据处理;使用SPSS 27.0软件进行描述统计、双因素方差分析(two-way ANOVA)、相关性分析;使用Origin 2021软件进行主成分分析并制图。

## 2 结果和分析

### 2.1 降水量和降水间隔时间对树番茄幼苗生长的影响

自然降水量(W)、降水量减少40%(W<sub>-</sub>)和降水量增加40%(W<sub>+</sub>)以及自然降水间隔时间(T)和延长降水间隔时间(T<sub>+</sub>)对树番茄幼苗生长的影响及双因素方差分析见表2。

2.1.1 对幼苗株高和地径的影响 结果(表2)显示:自然降水间隔时间条件下,W-T和W<sub>+</sub>-T组树番茄幼苗株高增长量、地径增长量均显著(P<0.05)高于W<sub>-</sub>-T组。延长降水间隔时间条件下,W-T<sub>+</sub>和W<sub>+</sub>-T<sub>+</sub>组株高增长量、地径增长量均显著高于W<sub>-</sub>-T<sub>+</sub>组,W<sub>+</sub>-T<sub>+</sub>组株高增长量还显著高于W-T<sub>+</sub>组。同一降水量条件下,延长降水间隔时间,除W-T<sub>+</sub>组的株高增长量降低外,其余处理组的株高增长量、地径增长量均升高,其中部分处理组间差异显著。总体上看,

表2 降水量和降水间隔时间对树番茄幼苗生长的影响及双因素方差分析( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>  
Table 2 Effects of precipitation and precipitation interval on *Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendtn. seedling growth and two-way ANOVA ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	株高增长量/cm Plant height increment	地径增长量/mm Ground diameter increment	根干质量/g Root dry mass	茎干质量/g Stem dry mass	叶干质量/g Leaf dry mass	总干质量/g Total dry mass
W-T	52.06±5.74Aa	7.00±0.96Ba	9.36±0.45Aa (29.6%)	12.43±0.36Aa (39.3%)	9.84±0.40Aa (31.1%)	31.64±0.70Aa
W <sub>-</sub> -T	30.94±2.05Bb	4.93±0.84Ab	2.60±0.19Ac (29.9%)	2.71±0.07Ac (31.3%)	3.38±0.33Bb (38.8%)	8.68±0.51Ac
W <sub>+</sub> -T	52.69±4.74Ba	7.53±1.21Aa	8.17±0.80Ab (29.8%)	9.08±0.77Ab (33.2%)	10.10±0.55Aa (37.0%)	27.35±1.19Ab
W-T <sub>+</sub>	51.39±4.45Ab	7.55±0.88Aa	8.58±0.38Ba (29.0%)	11.02±0.91Ba (37.1%)	10.03±0.15Aa (33.9%)	29.62±1.43Ba
W <sub>-</sub> -T <sub>+</sub>	32.68±2.90Ac	5.27±0.90Ab	2.30±0.48Ac (25.8%)	1.90±0.14Bc (21.6%)	4.66±0.13Ab (52.6%)	8.86±0.48Ac
W <sub>+</sub> -T <sub>+</sub>	56.46±6.99Aa	8.02±0.89Aa	7.29±0.37Ab (28.1%)	8.73±0.70Ab (33.5%)	9.96±0.36Aa (38.4%)	25.98±1.00Ab
P <sub>W</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P <sub>T</sub>	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01	<0.05	<0.05
P <sub>W×T</sub>	0.08	0.75	0.55	0.32	<0.05	0.17

<sup>1)</sup> 同列中不同大写字母表示同一降水量条件不同降水间隔时间处理间差异显著(P<0.05) Different uppercases in the same column indicate the significant differences (P<0.05) between different precipitation interval treatments under the same precipitation condition; 同列中不同小写字母表示同一降水间隔时间条件不同降水量处理间差异显著(P<0.05) Different lowercases in the same column indicate the significant differences (P<0.05) between different precipitation treatments under the same precipitation interval condition. 括号中百分数为各器官干质量占比 The percentages in parentheses are the proportion of dry mass of each organ.

<sup>2)</sup> W: 自然降水量 Natural precipitation; W<sub>-</sub>: 降水量减少40% 40% reduction in precipitation; W<sub>+</sub>: 降水量增加40% 40% increase in precipitation; T: 自然降水间隔时间 Natural precipitation interval; T<sub>+</sub>: 延长降水间隔时间 Extended precipitation interval. P<sub>W</sub>: 降水量处理的P值 P value for precipitation treatment; P<sub>T</sub>: 降水间隔时间处理的P值 P value for precipitation interval treatment; P<sub>W×T</sub>: 降水量与降水间隔时间交互作用的P值 P value for the interaction of precipitation and precipitation interval.

减少降水量会抑制树番茄幼苗株高、地径的增长,但延长降水间隔时间可促进树番茄幼苗株高、地径的增长,其中,增加降水量、延长降水间隔时间对株高、地径的增长效果最好。

双因素方差分析结果(表2)显示:降水量处理对树番茄幼苗株高增长量、地径增长量有极显著影响( $P<0.01$ );降水间隔时间处理对株高增长量有显著影响,对地径增长量有极显著影响;二者的交互作用对株高增长量、地径增长量的影响不显著。

**2.1.2 对幼苗干质量积累和分配的影响** 结果(表2)显示:自然降水间隔时间条件下, $W-T$ 和 $W_+-T$ 组树番茄幼苗根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量均显著高于 $W_-T$ 组, $W-T$ 组根干质量、茎干质量和总干质量还显著高于 $W_+-T$ 组。延长降水间隔时间条件下, $W-T_+$ 和 $W_+-T_+$ 组根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量均显著高于 $W_-T_+$ 组, $W-T_+$ 组根干质量、茎干质量和总干质量还显著高于 $W_+-T_+$ 组。同一降水量条件下,延长降水间隔时间,除 $W-T_+$ 和 $W_-T_+$ 组的叶干质量以及 $W_-T_+$ 组的总干质量升高外,其余处理组的根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量均降低,且多数处理组间差异不显著。总体上看,减少降水量会抑制树番茄幼苗根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量积累,但自然降水间隔时间可促进树番茄幼苗根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量积累,其中,自然降水间隔时间、自然降水量对根干质量、茎干质量和总干质量的积累效果最好,自然降水量、延长降水间隔时间对叶干质量的积累效果最好。

从根、茎、叶干质量占比(表2)看,自然降水间隔时间条件下,树番茄幼苗根干质量占比在各处理组间无明显差异,茎干质量占比在 $W-T$ 组最大,叶干质量占比在 $W_-T$ 组最大;延长降水间隔时间条件下,根、茎干质量占比在 $W-T_+$ 组最大,叶干质量占比在 $W_-T_+$ 组最大。同一降水量条件下,延长降水间隔时间,各处理组的根干质量和茎干质量占比基本上减少,叶干质量占比增大。总体上看,减少降水量、延长降水间隔时间,树番茄幼苗倾向于叶干质量的积累。

双因素方差分析结果(表2)显示:降水量处理对树番茄幼苗根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量有极显著影响;降水间隔时间处理对根干质量、叶干质量和总干质量有显著影响,对茎干质量有极显著影响;二者的交互作用对叶干质量有显著影响,对根

干质量、茎干质量和总干质量的影响不显著。

## 2.2 降水量和降水间隔时间对树番茄幼苗光合荧光特性的影响

自然降水量( $W$ )、降水量减少40%( $W_-$ )和降水量增加40%( $W_+$ )以及自然降水间隔时间( $T$ )和延长降水间隔时间( $T_+$ )对树番茄幼苗光合荧光特性的影响及双因素方差分析见表3。

**2.2.1 对叶片叶绿素含量的影响** 结果(表3)显示:自然降水间隔时间条件下, $W-T$ 和 $W_+-T$ 组除叶绿素 $a$ 含量与叶绿素 $b$ 含量的比值( $Chla/Chlb$ )显著( $P<0.05$ )低于 $W_-T$ 组外,树番茄幼苗叶片叶绿素 $a$ 含量、叶绿素 $b$ 含量和总叶绿素含量均显著高于 $W_-T$ 组。延长降水间隔时间条件下,除 $Chla/Chlb$ 值在各处理组间无显著差异外, $W-T_+$ 和 $W_+-T_+$ 组叶片叶绿素 $a$ 含量、叶绿素 $b$ 含量和总叶绿素含量均显著高于 $W_-T_+$ 组。同一降水量条件下,延长降水间隔时间,各处理组叶片叶绿素 $a$ 含量和 $Chla/Chlb$ 值均降低,各处理组叶片叶绿素 $b$ 含量和总叶绿素含量基本上升高,其中部分处理组间差异显著。总体上看,减少降水量会抑制树番茄幼苗叶片叶绿素含量积累,但延长降水间隔时间可促进树番茄幼苗叶片叶绿素 $b$ 含量和总叶绿素含量的积累,其中,自然降水量、延长降水间隔时间对总叶绿素含量的积累效果最好。

双因素方差分析结果(表3)显示:降水量处理对树番茄幼苗叶片叶绿素 $a$ 含量、叶绿素 $b$ 含量和总叶绿素含量有极显著影响( $P<0.01$ ),对 $Chla/Chlb$ 值有显著影响;降水间隔时间处理对叶片叶绿素 $a$ 含量有显著影响,对叶绿素 $b$ 含量和 $Chla/Chlb$ 值有极显著影响,对总叶绿素含量无显著影响;二者的交互作用对总叶绿素含量有显著影响,对叶绿素 $a$ 含量、叶绿素 $b$ 含量和 $Chla/Chlb$ 值的影响不显著。

**2.2.2 对叶片光合参数的影响** 结果(表3)显示:自然降水间隔时间条件下, $W-T$ 和 $W_+-T$ 组树番茄幼苗叶片净光合速率( $Pn$ )、气孔导度( $Gs$ )、胞间 $CO_2$ 浓度( $Ci$ )和蒸腾速率( $Tr$ )均显著高于 $W_-T$ 组,且4个光合参数均为 $W_+-T$ 组显著高于 $W-T$ 组; $W-T$ 组水分利用效率( $WUE$ )显著高于 $W_-T$ 和 $W_+-T$ 组,后二者间差异不显著。延长降水间隔时间条件下, $W-T_+$ 和 $W_+-T_+$ 组 $Pn$ 、 $Gs$ 、 $Ci$ 、 $Tr$ 和 $WUE$ 值均显著高于 $W_-T_+$ 组,且除 $WUE$ 值在 $W-T_+$ 组和 $W_+-T_+$ 组间无显著差异外,其余4个光合参数均为 $W_+-T_+$ 组显著高于 $W-T_+$ 组。同一降水量条件下,延长降水间隔

表 3 降水量和降水间隔时间对树番茄幼苗光合荧光参数的影响及双因素方差分析 ( $\bar{x} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Effects of precipitation and precipitation interval on photosynthetic fluorescence parameters of *Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendtn. seedlings and two-way ANOVA ( $\bar{x} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	叶绿素 a 含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Chlorophyll b content	总叶绿素含量/ (mg · g <sup>-1</sup> ) Total chlorophyll content	Chla/Chlb <sup>3)</sup>	净光合速率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Net photosynthetic rate	气孔导度/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Stomatal conductance	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) Intercellular CO <sub>2</sub> concentration
W-T	24.64±0.42Aa	11.53±0.59Ba	36.16±0.77Aa	2.14±0.11Ab	5.23±0.20Bb	0.28±0.02Bb	223.64±42.83Bb
W <sub>-</sub> -T	17.75±0.60Ab	5.44±1.17Ab	23.19±0.95Ab	3.38±0.82Aa	2.33±0.32Bc	0.05±0.04Ac	103.71±22.72Ac
W <sub>+</sub> -T	23.60±1.70Aa	10.92±1.12Ba	34.51±1.60Aa	2.18±0.31Ab	8.29±0.24Ba	0.42±0.03Ba	337.03±29.42Ba
W-T <sub>+</sub>	23.32±2.89Aa	15.49±2.43Aa	38.81±2.78Aa	1.54±0.34Ba	8.86±0.11Ab	0.36±0.03Ab	334.24±36.19Ab
W <sub>-</sub> -T <sub>+</sub>	13.51±2.48Bb	6.67±0.32Ab	20.18±2.16Bb	2.04±0.47Ba	3.48±0.19Ac	0.06±0.03Ac	138.34±23.44Ac
W <sub>+</sub> -T <sub>+</sub>	22.63±0.96Aa	13.59±1.75Aa	36.22±0.85Aa	1.69±0.30Aa	13.79±0.39Aa	0.57±0.03Aa	479.34±33.48Aa
P <sub>W</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
P <sub>T</sub>	<0.05	<0.01	0.58	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
P <sub>W×T</sub>	0.25	0.28	<0.05	0.25	<0.01	<0.01	<0.05

处理 <sup>2)</sup> Treatment <sup>2)</sup>	蒸腾速率/ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) Transpiration rate	水分利用效率/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) Water use efficiency	初始荧光 Initial fluorescence	最大荧光 Maximum fluorescence	可变荧光 Variable fluorescence	PS II 最大 光化学效率 Maximum photochemical efficiency of PS II	PS II 潜在活性 Potential activity of PS II
W-T	4.43±0.47Bb	1.19±0.08Ba	373.33±26.01Bb	1 782.33±200.80Bb	1 425.63±58.41Bb	0.80±0.07Aab	3.84±0.40Bb
W <sub>-</sub> -T	2.38±0.15Bc	0.98±0.15Ab	525.33±34.12Aa	1 239.67±88.16Ac	885.91±5.40Bc	0.72±0.05Bb	1.69±0.10Bc
W <sub>+</sub> -T	8.60±0.03Ba	0.96±0.03Bb	326.00±17.06Bb	2 370.33±191.44Aa	2 094.76±96.92Aa	0.89±0.12Aa	6.43±0.08Aa
W-T <sub>+</sub>	6.40±0.29Ab	1.39±0.08Aa	427.00±22.61Ab	2 356.67±222.34Aa	2 130.12±70.73Aa	0.91±0.09Aa	5.00±0.32Aa
W <sub>-</sub> -T <sub>+</sub>	3.44±0.38Ac	1.02±0.06Ab	514.67±24.58Aa	1 297.00±30.20Ab	1 036.84±30.09Ab	0.80±0.02Aa	2.02±0.04Ab
W <sub>+</sub> -T <sub>+</sub>	10.37±0.23Aa	1.33±0.01Aa	372.33±1.15Ac	2 626.33±243.19Aa	2 584.05±674.51Aa	1.00±0.34Aa	6.94±1.84Aa
P <sub>W</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.15	<0.01
P <sub>T</sub>	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	0.20	0.09
P <sub>W×T</sub>	<0.05	<0.05	0.07	0.08	0.27	0.99	0.63

<sup>1)</sup> 同列中不同大写字母表示同一降水量条件不同降水间隔时间处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different precipitation interval treatments under the same precipitation condition; 同列中不同小写字母表示同一降水间隔时间条件不同降水量处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different precipitation treatments under the same precipitation interval condition.

<sup>2)</sup> W: 自然降水量 Natural precipitation; W<sub>-</sub>: 降水量减少 40% 40% reduction in precipitation; W<sub>+</sub>: 降水量增加 40% 40% increase in precipitation; T: 自然降水间隔时间 Natural precipitation interval; T<sub>+</sub>: 延长降水间隔时间 Extended precipitation interval. P<sub>W</sub>: 降水量处理的 P 值 P value for precipitation treatment; P<sub>T</sub>: 降水间隔时间处理的 P 值 P value for precipitation interval treatment; P<sub>W×T</sub>: 降水量与降水间隔时间交互作用的 P 值 P value for the interaction of precipitation and precipitation interval.

<sup>3)</sup> Chla/Chlb: 叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量的比值 Ratio of chlorophyll a content to chlorophyll b content.

时间,各处理组 P<sub>n</sub>、G<sub>s</sub>、C<sub>i</sub>、T<sub>r</sub> 和 WUE 值均升高,且多数处理组间差异显著。总体上看,减少降水量会抑制树番茄幼苗的光合作用,但延长降水间隔时间可明显促进树番茄幼苗的光合作用,其中,增加降水量、延长降水间隔时间对叶片光合作用的促进效果最好。

双因素方差分析结果(表 3)显示:降水量处理和降水间隔时间处理对树番茄幼苗叶片的 5 个光合参数均有极显著影响;二者的交互作用对 P<sub>n</sub> 和 G<sub>s</sub> 值有极显著影响,对 C<sub>i</sub>、T<sub>r</sub> 和 WUE 值有显著影响。

2.2.3 对叶片荧光参数的影响 结果(表 3)显示:自然降水间隔时间条件下,除 W-T 和 W<sub>+</sub>-T 组树番茄幼苗叶片初始荧光 ( $F_0$ ) 显著低于 W<sub>-</sub>-T 组外,最大

荧光 ( $F_m$ )、可变荧光 ( $F_v$ )、PS II 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 和 PS II 潜在活性 ( $F_v/F_0$ ) 基本上均为 W-T 和 W<sub>+</sub>-T 组显著高于 W<sub>-</sub>-T 组, W<sub>+</sub>-T 组  $F_m$ 、 $F_v$  和  $F_v/F_0$  值还显著高于 W-T 组。延长降水间隔时间条件下, W-T<sub>+</sub> 和 W<sub>+</sub>-T<sub>+</sub> 组  $F_m$ 、 $F_v$  和  $F_v/F_0$  值均显著高于 W<sub>-</sub>-T<sub>+</sub> 组,  $F_0$  值显著低于 W<sub>-</sub>-T<sub>+</sub> 组,  $F_v/F_m$  值在 3 组间无显著差异。同一降水量条件下,延长降水间隔时间,各处理组  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  值基本上升高,仅部分处理组间差异显著。总体上看,减少降水量会降低树番茄幼苗叶片  $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  值,但延长降水间隔时间可升高树番茄幼苗叶片  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  值,其中,增加降水量、延长降

水间隔时间对  $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  值的提升效果最好。

双因素方差分析结果(表3)显示:降水量处理对树番茄幼苗叶片  $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v$  和  $F_v/F_o$  值有极显著影响,对  $F_v/F_m$  值无显著影响;降水间隔时间处理对  $F_o$  值有显著影响,对  $F_m$  和  $F_v$  值有极显著影响,对  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  值无显著影响;二者的交互作用对5个荧光参数影响均不显著。

### 2.3 树番茄幼苗生长和光合荧光参数的相关性分析

结果(表4)显示:树番茄幼苗大部分生长和光合荧光特性参数间有显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )相关性。株高增长量、地径增长量与PS II最大光化学效率呈显著相关,与其余指标均呈极显著相关。株高增长量、地径增长量、根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量间均呈极显著正相关。叶绿素  $a$  含量与叶绿素  $b$  含量的比值和初始荧光与其他大部分指标

表4 树番茄幼苗生长和光合荧光特性参数的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation analysis on growth and photosynthetic fluorescence parameters of *Cyphomandra betacea* (Cav.) Sendtn. seedlings<sup>1)</sup>

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient									
	PHI	GDI	$m_r$	$m_s$	$m_l$	$m_t$	$w_{Chla}$	$w_{Chlb}$	$w_{Chl}$	Chla/Chlb
PHI	1.000									
GDI	0.982 **	1.000								
$m_r$	0.915 **	0.880 **	1.000							
$m_s$	0.888 **	0.839 **	0.986 **	1.000						
$m_l$	0.978 **	0.966 **	0.943 **	0.914 **	1.000					
$m_t$	0.939 **	0.904 **	0.995 **	0.988 **	0.964 **	1.000				
$w_{Chla}$	0.826 **	0.797 **	0.889 **	0.871 **	0.834 **	0.880 **	1.000			
$w_{Chlb}$	0.863 **	0.879 **	0.821 **	0.814 **	0.849 **	0.841 **	0.655 **	1.000		
$w_{Chl}$	0.927 **	0.918 **	0.942 **	0.928 **	0.924 **	0.947 **	0.921 **	0.898 **	1.000	
Chla/Chlb	-0.612 **	-0.626 **	-0.501 *	-0.491 *	-0.618 **	-0.541 *	-0.189	-0.774 **	-0.509 *	1.000
Pn	0.833 **	0.891 **	0.589 *	0.542 *	0.760 **	0.631 **	0.558 *	0.761 **	0.718 **	-0.586 *
Gs	0.930 **	0.957 **	0.742 **	0.692 **	0.867 **	0.771 **	0.705 **	0.791 **	0.819 **	-0.572 *
Ci	0.867 **	0.916 **	0.643 **	0.594 **	0.812 **	0.684 **	0.587 *	0.786 **	0.748 **	-0.611 **
Tr	0.825 **	0.885 **	0.588 *	0.510 *	0.768 **	0.619 **	0.567 *	0.662 **	0.672 **	-0.507 *
WUE	0.595 **	0.607 **	0.523 *	0.571 *	0.560 *	0.563 *	0.423	0.801 **	0.660 **	-0.652 **
$F_o$	-0.893 **	-0.865 **	-0.834 **	-0.780 **	-0.890 **	-0.843 **	-0.793 **	-0.634 **	-0.789 **	0.455
$F_m$	0.876 **	0.936 **	0.730 **	0.677 **	0.853 **	0.757 **	0.725 **	0.800 **	0.836 **	-0.534 *
$F_v$	0.833 **	0.888 **	0.643 **	0.595 **	0.777 **	0.674 **	0.592 **	0.794 **	0.755 **	-0.596 **
$F_v/F_m$	0.495 *	0.520 *	0.334	0.307	0.432	0.358	0.216	0.516 *	0.392	-0.507 *
$F_v/F_o$	0.869 **	0.908 **	0.692 **	0.627 **	0.820 **	0.715 **	0.667 **	0.733 **	0.767 **	-0.530 *

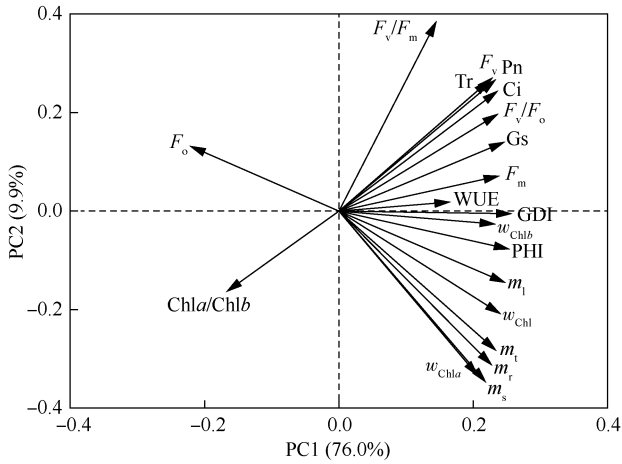
指标 Index	相关系数 Correlation coefficient									
	Pn	Gs	Ci	Tr	WUE	$F_o$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$	$F_v/F_o$
Pn	1.000									
Gs	0.949 **	1.000								
Ci	0.976 **	0.958 **	1.000							
Tr	0.954 **	0.954 **	0.950 **	1.000						
WUE	0.633 **	0.531 *	0.604 **	0.401	1.000					
$F_o$	-0.659 **	-0.840 **	-0.726 **	-0.759 **	-0.250	1.000				
$F_m$	0.908 **	0.933 **	0.910 **	0.907 **	0.566 *	-0.789 **	1.000			
$F_v$	0.917 **	0.927 **	0.940 **	0.906 **	0.553 *	-0.694 **	0.865 **	1.000		
$F_v/F_m$	0.582 *	0.578 *	0.626 **	0.571 *	0.331	-0.346	0.378	0.788 **	1.000	
$F_v/F_o$	0.886 **	0.949 **	0.925 **	0.934 **	0.418	-0.829 **	0.887 **	0.968 **	0.705 **	1.000

<sup>1)</sup> PHI: 株高增长量 Plant height increment; GDI: 地径增长量 Ground diameter increment;  $m_r$ : 根干质量 Root dry mass;  $m_s$ : 茎干质量 Stem dry mass;  $m_l$ : 叶干质量 Leaf dry mass;  $m_t$ : 总干质量 Total dry mass;  $w_{Chla}$ : 叶绿素  $a$  含量 Chlorophyll  $a$  content;  $w_{Chlb}$ : 叶绿素  $b$  含量 Chlorophyll  $b$  content;  $w_{Chl}$ : 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Chla/Chlb: 叶绿素  $a$  含量与叶绿素  $b$  含量的比值 Ratio of chlorophyll  $a$  content to chlorophyll  $b$  content; Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间  $CO_2$  浓度 Intercellular  $CO_2$  concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; WUE: 水分利用效率 Water use efficiency;  $F_o$ : 初始荧光 Initial fluorescence;  $F_m$ : 最大荧光 Maximum fluorescence;  $F_v$ : 可变荧光 Variable fluorescence;  $F_v/F_m$ : PS II 最大光化学效率 Maximum photochemical efficiency of PS II;  $F_v/F_o$ : PS II 潜在活性 Potential activity of PS II. \*:  $P<0.05$ ; \*\*:  $P<0.01$ .

均呈显著或极显著负相关。总体上看, 光合作用增强将促进树番茄幼苗的株高和地径增长及干物质积累。

#### 2.4 树番茄幼苗生长和光合荧光参数的主成分分析

结果(图 1)显示: PC1、PC2 轴的方差解释率分别为 76.0% 和 9.9%, 累计解释率为 85.9%, 其中 PC1 轴主要与地径增长量、叶绿素 *b* 含量、水分利用效率和最大荧光有关, PC2 轴主要与茎干质量、叶绿素 *a* 含量和 PS II 最大光化学效率有关。总体上看, 叶绿素 *a* 含量与叶绿素 *b* 含量的比值 (Chla/Chlb) 和初始荧光 ( $F_0$ ) 与其他参数为负相关关系, 除 Chla/Chlb 和  $F_0$  值外, 其他参数间均具有正相关关系。



PHI: 株高增长量 Plant height increment; GDI: 地径增长量 Ground diameter increment;  $m_r$ : 根干质量 Root dry mass;  $m_s$ : 茎干质量 Stem dry mass;  $m_l$ : 叶干质量 Leaf dry mass;  $m_t$ : 总干质量 Total dry mass;  $w_{Chla}$ : 叶绿素 *a* 含量 Chlorophyll *a* content;  $w_{Chlb}$ : 叶绿素 *b* 含量 Chlorophyll *b* content;  $w_{Chl}$ : 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Chla/Chlb: 叶绿素 *a* 含量与叶绿素 *b* 含量的比值 Ratio of chlorophyll *a* content to chlorophyll *b* content; Pn: 净光合速率 Net photosynthetic rate; Gs: 气孔导度 Stomatal conductance; Ci: 胞间  $CO_2$  浓度 Intercellular  $CO_2$  concentration; Tr: 蒸腾速率 Transpiration rate; WUE: 水分利用效率 Water use efficiency;  $F_0$ : 初始荧光 Initial fluorescence;  $F_m$ : 最大荧光 Maximum fluorescence;  $F_v$ : 可变荧光 Variable fluorescence;  $F_v/F_m$ : PS II 最大光化学效率 Maximum photochemical efficiency of PS II;  $F_v/F_0$ : PS II 潜在活性 Potential activity of PS II.

图 1 树番茄幼苗生长和光合荧光参数的主成分 (PC) 分析  
Fig. 1 Principal component (PC) analysis on growth and photosynthetic fluorescence parameters of *Cythomandra betacea* (Cav.) Sendtn. seedlings

### 3 讨论和结论

#### 3.1 幼苗生长对降水的响应

植物生长量反映了植物对降水变化的敏感性, 可为植物在降水模式不同的地区控制降水以促进植物生长提供重要参考依据<sup>[23]</sup>。已有结果表明: 降水间

隔时间与降水量均会影响植物生长和生物量积累, 二者相互作用共同影响植物幼苗生长和发育, 降水量增加 50% 会显著 ( $P < 0.05$ ) 促进株高、地径增长, 降水间隔时间由 5 d 延长到 15 d 植物地上生物量积累增加<sup>[24]</sup>。本研究中, 减少降水量会抑制树番茄幼苗株高、地径增长, 也会抑制树番茄幼苗根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量积累, 说明与减少降水量相比, 自然降水量和增加降水量均有利于幼苗株高、地径的生长及各器官干物质积累。李新乐等<sup>[25]</sup>的研究结果显示: 降水量增加 50%, 白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobrov) 和油蒿 (*Artemisia ordosica* Krasch.) 2 种荒漠植物幼苗株高、平均冠幅和基径显著增加; 何莹莹等<sup>[26]</sup>的研究结果显示: 降水量增加 30%, 油蒿幼苗生物量显著增加。表明在一定降水范围内增加降水量, 有利于促进树番茄幼苗的生长以及干物质积累, 进一步说明适宜水分环境对树番茄幼苗生长的重要性。本研究中, 延长降水间隔时间可以促进树番茄幼苗株高、地径的增长, 但自然降水间隔时间却有利于树番茄幼苗根干质量、茎干质量、叶干质量和总干质量积累。产生这一现象的原因可能是在一定降水量范围内, 降水频次增多, 植物充分利用水分进行光合作用制造有机物, 促进各器官养分含量的积累, 进而增加了植株各器官干质量及总干质量, 但在一定的水淹环境中, 植物根系无氧呼吸会造成烂根现象, 阻碍植株伸长、增粗<sup>[27]</sup>。这与 Knapp 等<sup>[28]</sup>对须芒草 (*Andropogon virginicus* Linn.) 生长对降水量变化的响应研究结果一致。表明只有在一定水量范围内控制降水间隔时间才能将其促进树番茄幼苗生长及干物质积累的效果达到最佳。

降水量和降水间隔时间会直接影响植物的物质积累和运输<sup>[29]</sup>。本研究发现, 减少降水量将有利于提高树番茄叶干质量占比, 且除自然降水间隔时间下的根干质量占比外, 相比于减少降水量, 自然降水量和增加降水量有利于提高树番茄幼苗根干质量占比和茎干质量占比。这是因为植物在面对不同生态环境时, 会通过调整资源配置进行响应, 以达到自身功能平衡状态, 称之为“可塑性”, 这种“可塑性”可以帮助植物适宜各种自然环境<sup>[30]</sup>。整体而言, 树番茄幼苗根、茎、叶干质量均在自然降水量或增加降水量, 同时处于自然降水间隔时间条件下达到峰值。由此可见, 与减少降水量相比, 自然降水量或增加降水量、自然降水间隔时间将有利于树番茄幼苗各器官干物质

的积累。其中与降水间隔时间比,降水量对树番茄幼苗各器官干物质积累的影响更大。

### 3.2 叶片光合参数对降水的响应

降水变化在全球气候变化中发挥着重要作用,在不同尺度上影响着生态系统水平平衡、植被分布和植被的生理变化过程等,而水分作为植物光合作用不可或缺的原料,水分失衡直接影响植物生长<sup>[31]</sup>。水分条件也是影响植物水分利用效率的主要因子,研究降水变化与植物光合参数间的关系尤为重要<sup>[32]</sup>。有研究表明:随着降水减少,沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)苗木中的净光合速率、气孔导度和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度显著降低( $P < 0.05$ ),而气孔限制值上升,表明净光合速率降低的原因与气孔限制有关<sup>[33]</sup>。本研究中,降水量增加,树番茄幼苗叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度和蒸腾速率均升高,说明增加降水量可以促进树番茄幼苗的光合作用。当降水量较少时,土壤水分较少,由于受到逆境环境的压迫,植物会根据实际情况减小叶片气孔开度甚至将气孔关闭,进而导致气孔导度和蒸腾速率降低,以避免蒸腾速率提高引起幼苗缺失死亡。当降水量增加时,植株根系吸水获得足量水分,引起气孔开度增大进而提高蒸腾速率,使叶片温度降低,从而增加了植物的净光合速率<sup>[34]</sup>。也有研究表明:水分亏缺和过量都会直接影响植物光合作用,长期加湿后,植物叶片净光合速率会显著增加<sup>[35]</sup>。这与本研究结果一致。说明在水分环境处于适宜树番茄幼苗生长的范围下,相比于自然降水量和减少降水量,增加降水量可促进树番茄幼苗的光合作用。

本研究中,延长降水间隔时间,叶片光合参数均保持较高水平,这是因为水分是这些环境中的限制因子,降水间隔时间延长,降水频次减少,植物根系在一定水分范围内可避免水淹,且可持续利用水分促进光合作用<sup>[36]</sup>。延长降水间隔时间,树番茄幼苗的水分利用效率提高,这是由于延长降水间隔时间会降低树番茄幼苗周围空气湿度和土壤含水量,从而减少水分直接蒸发损失,使植物更依赖高效的水分吸收机制,水分利用效率提高。这与Osonubi等<sup>[37]</sup>的研究结果类似,进一步表明延长降水间隔时间,植物叶片充分吸收水分提高水分利用效率,可促进光合系统光合电子传递,进而提高其光合速率。此外,相关性和主成分分析结果显示:树番茄幼苗光合参数与植物生长参数间联系紧密,正相关程度高,光合作用增强将促进

树番茄幼苗的株高、地径增长及干物质积累,也验证了本研究结果,增加降水量可促进树番茄幼苗光合作用,促进树番茄幼苗各器官干物质积累。综上,增加降水量、延长降水间隔时间倾向于促进树番茄幼苗的光合作用,在不同降水量和降水间隔时间处理下,树番茄幼苗表现出不同的生理生态适应策略。因此,在未来树番茄苗木培育过程中,可根据当地降水环境,在一定的降水范围内制定适宜的水分管理策略。

### 3.3 叶片叶绿素含量和荧光参数对降水的响应

叶绿素是绿色植物进行光合作用的关键基础物质,体现了植物的光合能力和抗逆能力<sup>[38-39]</sup>。一些研究指出,随着干旱胁迫程度的增强,叶绿素含量显著降低( $P < 0.05$ ),降水量增加,光合色素含量也增加<sup>[40]</sup>。本研究中,2个降水间隔时间条件下,减少降水量处理的树番茄幼苗叶片叶绿素 $a$ 含量、叶绿素 $b$ 含量、总叶绿素含量均低于自然降水量和增加降水量处理,原因可能是水分缺失造成了植物氧化机体损伤,进而破坏了植物叶肉细胞,抑制了发生光合作用所需原料的积累<sup>[41]</sup>。树番茄幼苗对于干旱胁迫条件较为敏感,也进一步表明树番茄是对水分较为敏感的树种。叶绿素 $a$ 含量与叶绿素 $b$ 含量的比值( $\text{Chla}/\text{Chlb}$ )反映了植物对光照的适应,该值上升说明光合速率下降<sup>[42]</sup>。本研究中,减少降水量, $\text{Chla}/\text{Chlb}$ 值较大,说明减少降水量抑制树番茄幼苗的光合作用。

本研究结果显示:树番茄幼苗叶片光合参数和荧光参数间具有密切关系。这与刘歌畅等<sup>[43]</sup>的研究结果相同。荧光参数反映了植物光合作用内在特性,可反映植物在逆境环境中的光合生理状况<sup>[44]</sup>。荧光参数常作为植物在干旱、水淹、盐碱等胁迫环境条件下抗逆变化的重要指标<sup>[14]</sup>。PS II最大光化学效率( $F_v/F_m$ )能反映植物是否受到环境胁迫,在非胁迫下其数值处于0.80~0.83,而在环境胁迫下则会下降甚至急剧降低<sup>[45]</sup>。本研究中,在减少降水量处理下的 $F_v/F_m$ 值均小于或等于0.80,在自然降水量和增加降水量处理下的 $F_v/F_m$ 值为0.80~1.00,且在增加降水量处理下的值较大。说明在减少降水量环境下树番茄幼苗生长处于逆境环境,而在增加降水量环境下处于一个适宜生长的环境。

研究表明:土壤水分变化会引起荧光参数如初始荧光( $F_0$ )、可变荧光( $F_v$ )、最大荧光( $F_m$ )、 $F_v/F_m$ 值等的变化<sup>[46]</sup>。Guo等<sup>[47]</sup>报道了蒙古扁桃(*Prunus mongolica* Maxim.)幼苗荧光参数对土壤干旱胁迫的

响应,研究发现在土壤缺水条件下,幼苗  $F_o$  值升高,而  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  值均下降。本研究中,降水量增加,树番茄幼苗叶片的  $F_o$  值降低, $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_m$  值及 PS II 潜在活性( $F_v/F_o$ )升高,且延长降水间隔时间处理的5个荧光参数基本上均升高。表明增加降水量、延长降水间隔时间能增大树番茄幼苗的荧光效率,且降水量增加对荧光效率增高的影响更明显,结合不同降水量和不同降水间隔时间处理下树番茄幼苗光合参数的变化进一步从机制上解释了降水量的增加会促进幼苗的光合作用,同时也再次说明在一定降水范围内增加降水量、延长降水间隔时间有利于树番茄幼苗生长。

### 3.4 结论

本研究是在降水量较为充足的昆明进行的,而树番茄在云南多种植在降水量少的腾冲、红河等地,因此本实验在地点选择上具有一定的局限性。此外,本文仅研究了调整降水量和降水间隔时间来模拟不同的水分环境,然而自然界的降水过程复杂多变,包括降水强度、降水持续时间、降水季节分布等多个因子,这些因子均可能对树番茄幼苗生长产生影响。因此,本文较为简单的模拟降水实验可能无法全面反映降水变化对树番茄幼苗生长的真实影响,在未来可以结合更多有关降水过程的因子更加全面地分析降水对树番茄幼苗生长及光合作用的影响。且本研究是在试验大棚进行,仅测定了树番茄幼苗部分生理生化指标,还停留在植物苗期水平,在未来,可以测定一些酶和养分元素指标,同时在基因层次更深入地研究其调控机制,进而移栽树番茄到野外实地,长时间监测树番茄在野外实地生长的动态变化以及对自然环境降水的响应,同时还可以进一步培育树番茄至果实长出,探索果实成分及品质,以期为促进树番茄生长和提高树番茄产量提供更好的参考。

综上所述,降水量和降水间隔时间对树番茄幼苗生长、叶绿素含量、光合参数和荧光参数有不同的影响。增加降水量明显提高了土壤含水量,树番茄幼苗的株高、地径以及各器官干质量均得到了增长。树番茄幼苗在减少降水量处理下的叶绿素  $a$  含量、叶绿素  $b$  含量、总叶绿素含量均显著( $P<0.05$ )低于自然降水量和增加降水量处理,且减少降水量处理下的叶绿素  $a$  含量与叶绿素  $b$  含量的比值较大,即减少降水量会抑制树番茄幼苗的光合作用。树番茄幼苗在不同降水量和降水间隔时间处理下净光合速率的变化主要是由气孔限制。净光合速率、气孔导度、胞间  $CO_2$  浓

度和蒸腾速率均在增加降水量、延长降水间隔时间处理下保持较高值。树番茄幼苗的初始荧光在减少降水量处理下保持较高水平,在增加降水量处理中则较低,而最大荧光、可变荧光、PS II 最大光化学效率和 PS II 潜在活性在增加降水量处理下保持较高水平,在减少降水量处理下则较低。树番茄幼苗在不同降水量和降水间隔时间下进行了一系列适应性调节,增加降水量、延长降水间隔时间有利于树番茄幼苗生长和光合作用,其中增加降水量的影响效果更明显。

### 参考文献:

- [1] 郭碧瑜,周伟华,叶青莲,等. 树番茄的生物学特性及栽培技术[J]. 广东农业科学, 2007(12): 102-103.
- [2] 韦兴兰,李树萍,王元友,等. 土壤含水量对树番茄苗木生长及非结构性碳水化合物的影响[J]. 经济林研究, 2024, 42(1): 178-188.
- [3] 张启霄. 喀斯特弃耕地植物叶片-凋落物-土壤养分元素对降雨格局的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2022: 1.
- [4] 胡雯,周小慧,李勤奋,等. 旱季降雨格局变化对益智生长和碳氮代谢的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(12): 2597-2605.
- [5] FURTAK K, WOLIŃSKA A. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture: a review [J]. Catena, 2023, 231: 107378.
- [6] ZARGAR S M, GUPTA N, NAZIR M, et al. Impact of drought on photosynthesis: molecular perspective[J]. Plant Gene, 2017, 11: 154-159.
- [7] 包玉,王志泰. 大叶黄杨对土壤水分梯度胁迫的生长与生理响应[J]. 干旱区地理, 2011, 34(2): 208-214.
- [8] 董丽佳,桑卫国. 模拟增温和降水变化对北京东灵山辽东栎种子出苗和幼苗生长的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(8): 819-830.
- [9] MARTIN STPAUL N K, LIMOUSIN J-M, RODRÍGUEZ-CALCERRADA J, et al. Photosynthetic sensitivity to drought varies among populations of *Quercus ilex* along a rainfall gradient [J]. Functional Plant Biology, 2012, 39: 25-37.
- [10] LI Y G, JIANG G M, LIU M Z, et al. Photosynthetic response to precipitation/rainfall in predominant tree (*Ulmus pumila*) seedlings in Hunshandak Sandland, China [J]. Photosynthetica, 2007, 45(1): 133-138.
- [11] 董建力,许兴,李树华,等. 旱胁迫对不同春小麦叶绿素含量的影响及与抗旱性的关系[J]. 华北农学报, 2011, 26(3): 120-123.
- [12] MURATA N, TAKAHASHI S, NISHIYAMA Y, et al. Photoinhibition of photosystem II under environmental stress [J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2007, 1767: 414-421.
- [13] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性

- 及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909.
- [14] 赵英, 吴敏, 叶晓霞, 等. 干旱与复水对喀斯特地区红背山麻杆生长及叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(9): 1537-1546.
- [15] 张玉玉, 王进鑫, 马戎, 等. 干旱后复水对侧柏幼苗叶绿素含量的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(5): 10-17.
- [16] 李树萍, 李世民, 郭焕仙, 等. 光照对树番茄幼苗碳、氮、磷、钾元素积累与分配的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(2): 313-319.
- [17] 孙丽娟, 李世民, 郭焕仙, 等. 树番茄幼苗生长与氮磷钾化学计量特征对光照、肥料的响应[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(8): 1793-1804.
- [18] 金友帆, 李世民, 李树萍, 等. 镉对不同种源树番茄种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(5): 125-130.
- [19] 段燕楠, 王占良, 王顺金. 基于降雨的昆明水库蓄水模式分析及风险研究[J]. 云南地理环境研究, 2019, 31(2): 13-19.
- [20] 李宝芬, 和方昭. 昆明市年降水量时空分布特征[J]. 水资源研究, 2016, 5(2): 182-189.
- [21] 岳永寰, 靳瑰丽, 宫珂, 等. 人工模拟降水格局变化对醉马草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 838-846.
- [22] 唐婧文, 梁文斌, 邹辉, 等. 土壤水分胁迫对多花黄精光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 110-118.
- [23] 张浩, 王新平, 张亚峰, 等. 干旱荒漠区不同生活型植物生长对降雨量变化的响应[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1847-1853.
- [24] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 等. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1155-1164.
- [25] 李新乐, 张景波, 董雪, 等. 模拟增雨对荒漠植物幼苗生长和根系形态的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3452-3461.
- [26] 何莹莹, 于明含, 丁国栋, 等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)幼苗生长及生物量分配对降雨量和降雨间隔的响应[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 183-191.
- [27] 韩文娇, 白林利, 李昌晓. 水淹胁迫对狗牙根光合、生长及营养元素含量的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(5): 49-59.
- [28] KNAPP A K, FAY P A, BLAIR J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland[J]. *Science*, 2002, 298: 2202-2205.
- [29] 张衷华, 王化, 唐中华, 等. 松嫩草地不同降水区土壤盐碱化程度与羊草生产力关系的比较研究[J]. 草地学报, 2016, 24(3): 590-597.
- [30] YU M H, DING G D, GAO G L, et al. Double effects of age and environment on resource allocation trade-offs of *Salix psammophila* in different microtopographic habitats of a sand dune[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2020, 39: 544-552.
- [31] MU X H, ZHENG X J, HUANG G, et al. Responses of ephemeral plants to precipitation changes and their effects on community in central Asia cold desert[J]. *Plants*, 2023, 12: 2841.
- [32] DU L, TIAN S C, SUN J, et al. Ecosystem multifunctionality, maximum height, and biodiversity of shrub communities affected by precipitation fluctuations in Northwest China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1259858.
- [33] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [34] LAWLOR D W, TEZARA W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes[J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(4): 561-579.
- [35] WANG H M, LI Z K, JI S W, et al. Response of water and photosynthetic physiological characteristics to leaf humidification in *Calligonum ebinuricum*[J]. *PLoS ONE*, 2023, 18(5): e0285130.
- [36] 王朝英, 李昌晓, 张晔. 水淹对枫杨幼苗光合生理特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 675-682.
- [37] OSONUBI O, DAVIES W J. The influence of water stress on the photosynthetic performance and stomatal behaviour of tree seedlings subjected to variation in temperature and irradiance[J]. *Oecologia*, 1980, 45: 3-10.
- [38] RIAZ A, YOUNIS A, TAJ A R, et al. Effect of drought stress on growth and flowering of marigold (*Tagetes erecta* L.)[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2013, 45(S1): 123-131.
- [39] 李洁, 列志喏, 薛立, 等. 干旱胁迫对3种园林绿化树种幼苗生理指标的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(2): 56-61.
- [40] 董守坤, 赵坤, 刘丽君, 等. 干旱胁迫对春大豆叶绿素含量和根系活力的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(6): 949-953.
- [41] 石玉玲, 许妍, 肖黄巧, 等. 干旱胁迫对猕猴桃叶片及光合作用的影响[J]. 湖南农业科学, 2024(6): 32-37.
- [42] 桂仁意, 刘亚迪, 郭小勤, 等. 不同剂量<sup>137</sup>Cs- $\gamma$ 辐射对毛竹幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物学报, 2010, 45(1): 66-72.
- [43] 刘歌畅, 岳丽华, 刘春海, 等. 干旱胁迫对俄罗斯大果沙棘幼苗光合荧光参数的影响[J]. 北方园艺, 2022(22): 16-23.
- [44] 热依汗·阿布力孜, 何学敏, 杨欢, 等. 不同水盐生境下小叶碱蓬叶绿素荧光参数特征及其对土壤因子的响应[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(2): 485-494.
- [45] 李泽, 谭晓风, 卢锟, 等. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1515-1524.
- [46] 罗怡清, 张博文, 杜健. 持续干旱对毛竹实生苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(3): 26-30.
- [47] GUO Y Y, YU H Y, KONG D S, et al. Effects of gradual soil drought stress on the growth, biomass partitioning, and chlorophyll fluorescence of *Prunus mongolica* seedlings[J]. *Turkish Journal of Biology*, 2015, 39: 532-539.

(责任编辑: 郭严冬)