

持续高温条件对4个百香果品种开花坐果习性及其光合的影响

黄显雅¹, 陈格^{2,3#}, 黄永才^{2,3}, 桂杰^{2,3}, 黄诚梅^{2,3}, 鞠莹^{2,3}, 盛静文^{2,3}, 蒋萍^{2,3} 杨柳^{2,3*}

1广西壮族自治区农业科学院/广西壮族自治区亚热带作物研究所, 南宁 530001

2广西壮族自治区农业科学院/广西作物遗传改良重点实验室, 南宁 530004

3农业农村部百香果生物学与遗传育种重点实验室, 南宁 530004

摘要: 【目的】为评价田间持续高温条件下钦蜜9号和小黄金、台农1号和满天星等4个百香果品种的耐热性, 为未来耐高温育种材料快速筛选和广西百香果夏季种植布局提供理论参考。【方法】选择日最高温连续5天超过32°C(即持续高温)的时段, 到南宁和贵港的百香果种植基地进行4个百香果品种开花坐果及光合作用调查。采用田间调查方法记录百香果开花坐果情况, 同时利用LI-6400XT便携式光合作用测量系统获得百香果的光合作用数据, 结合统计学方法探讨持续高温条件下4个百香果品种的开花坐果和光合作用差异, 并分析开花坐果和光合作用之间的关联性。【结果】测定结果发现, 两地持续高温条件下开花坐果和光合作用结果数值最高的是钦蜜9号, 其次是小黄金和台农1号, 最低的是满天星。开花坐果方面, 钦蜜9号的平均枝节数、平均花朵数、平均花芽数和平均挂果数显著高于其他3个品种($p<0.05$), 最高分别可达到71.85节/株、20.90朵/株、21.60个/株和6.25个/株。光合作用方面, 钦蜜9号的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)分别是满天星的3.64倍、11.62倍、5.46倍和6.60倍, 差异显著($p<0.05$)。【结论】钦蜜9号具有较好的耐热性, 可作为夏季主栽品种在全广西推广种植或与其他品种配套种植, 以改善其他品种百香果由于夏季高温产量降低导致的市场萎缩, 提升广西百香果主产区优势, 同时可以将其作为耐热育种的亲本材料。

关键词: 百香果; 高温条件; 开花坐果习性; 光合特征

中图分类号: S667.9 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2024)07-0001-08

Effects of continuous high-temperature on flowering and fruit-setting habits and photosynthesis of four passion fruit varieties

HUANG Xian-ya¹, CHEN Ge^{2,3#}, HUANG Yong-cai^{2,3}, GUI Jie^{2,3}, HUANG Cheng-mei^{2,3}, JU Ying^{2,3}, SHENG Jing-wen^{2,3}, JIANG Ping^{2,3}, WEI Rong-xing^{2,3}, YANG Liu^{2,3*}

(1. Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China; 2. Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Guangxi Crop Genetic Improvement and Biotechnology Lab, Nanning 530007, China; 3. Key Laboratory of Passion Fruit Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning 530007, China)

Abstract: 【Objective】To provide theoretical reference for the rapid screening of breeding materials for high-temperature tolerance and summer planting layout in Guangxi, passion fruit varieties such as Qinmi NO.9, Xiaohuangjin, Tainong NO.1 and Mantianxing were chosen as research objects to evaluate the heat resistance of

收稿日期: 2024-03-29 接受日期: 2024-04-29

基金项目: 广西重点研发计划(桂科AB23026070); 南宁市科技重大专项(20212007); 钦州市科学研究与技术开发计划(20233207); 广西农科院院发展基金项目(桂农科2022JM68, 2024YP088); 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科2021YT123)

作者简介: 黄显雅, 女, 硕士, 主要从事百香果栽培及新品种选育工作。E-mail: 1306475557@qq.com。#为共同第一作者, 陈格, 女, 硕士, 主要从事百香果种质资源引进及优质化育种工作。E-mail: 1002965539@qq.com。

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: 717854621@qq.com

different passion fruit varieties under continuous high-temperature conditions in the field. 【Methods】 When the maximum daily temperature exceeded 32°C for 5 consecutive days, the flowering, fruit set, and photosynthesis of 4 passion fruit varieties were investigated in Nanning and Guigang orchards. Four-point sampling method was used to randomly select 5 healthy passion fruit plants with the same growth trend in 4 growth directions from 4 regional centers divided by diagonal lines to observe flowering and fruit setting. Simultaneously, the photosynthetic data of passion fruit were obtained by LI-6400XT portable photosynthesis measurement system. Subsequently, statistical software was used to compare the differences in flowering, fruit set, and photosynthesis of 4 passion fruit varieties under continuous high-temperature conditions, and then the heat resistance of 4 passion fruit varieties was evaluated. Meanwhile, the Pearson correlation coefficient was used to explore the potential relationship between flowering, fruit setting, and photosynthesis of 4 passion fruit varieties. 【Results】 The results showed that Qinmi No. 9 had the strongest flowering, fruit set, and photosynthesis, followed by Xiaohuangjin and Tainong No. 1, and the weakest was Mantianxing in both orchards. All parameters showed significant differences among varieties except for a few parameters of passion fruit variety that showed significant differences in different passion fruit orchards ($p < 0.05$). In terms of flowering and fruiting, the average number of branches, flowers, buds, and fruits of Qinmi 9 reached 71.85 nodes per plant, 20.90 flowers per plant, 21.60 buds per plant, and 6.25 fruits per plant, respectively, which were 5.70 nodes per plant, 16.85 flowers per plant, 14.90 buds per plant, and 5.05 fruits per plant more than Xiaohuangjin. It was 11.75 nodes per plant, 19.25 flowers per plant, 18.50 buds per plant, and 5.40 fruits per plant more than Tainong No. 1, and 10.6 nodes per plant, 19.45 flowers per plant, 18.85 buds per plant, and 5.70 fruits per plant more than Mantianxing. For photosynthesis, the net photosynthetic rate (P_n) of Qinmi NO.9 was 21.16 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, which was 6.78 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 11.32 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and 13.33 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ higher than that of Xiaohuangjin, Tainong NO.1 and Mantianxing, respectively; the stomatal conductance (G_s) was higher by 0.19 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 0.26 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and 0.32 $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ than Xiaohuangjin, Tainong No.1 and Mantianxing, respectively; the intercellular CO_2 concentration (C_i) was 18.14% higher than that of Xiaohuangjin, 58.67% higher than that of Tainong No.1, and 5 times higher than that of Mantianxing, and the transpiration rate (T_r) is 3 times that of Xiaohuangjin, 3.8 times that of Tainong No.1, and 6.1 times that of Mantianxing. 【Conclusion】 Compared with the other three varieties, Qinmi No. 9 has better heat resistance, and can be used as the main variety promoting in Summer Guangxi, or planted with other varieties, to improve the market contraction caused by yield reduction of other varieties due to the summer high-temperature. It can also enhance Guangxi's regional advantages as main national passion fruit producing area. Meanwhile, Qinmi No. 9 can be used as a fine parent material for future heat-resistance breeding.

Key words: Passion fruit; high temperature; flowering and fruiting habits; photosynthetic

广西作为我国主要的百香果产区, 主栽的品种包括黄果型(钦蜜9号和小黄金)和紫果型(台农1号 and 满天星)。在广西百香果产业发展调研过程中发现, 百香果产期遭遇日最高温连续5天超过32°C(即持续高温)百香果会出现花芽退化、花败育及落果的现象。前期研究表明百香果对高温极其敏感, 气温高于32°C时百香果会出现花器发育不健全、花芽退化、花朵授精受阻及影响果品质等现象^[1-2]。田青兰等^[3]发现台农1号在花期前20~35 d、开花当天及花后5~20 d的时候, 出现最高温度和平均温度分别高于36.19°C和26.24°C的情况时, 花芽的形成和坐果会受到抑制。Atsushi等^[4]分析温度对Summer Queen和

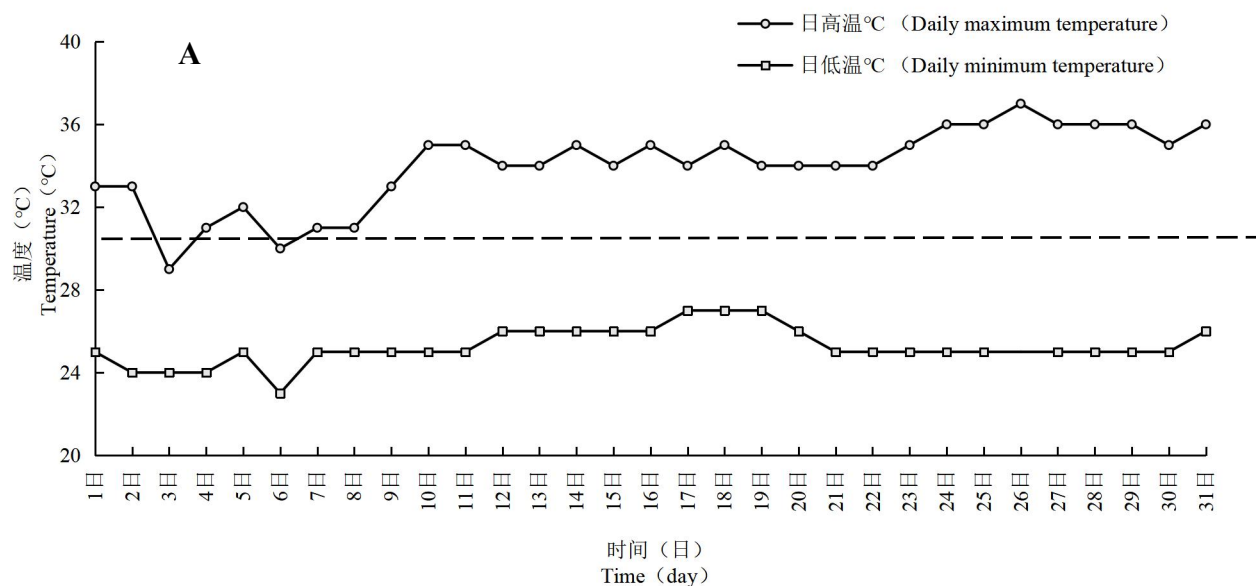
Ruby Star 光合作用影响, 结果发现两者的光合速率 (P_n) 和气孔导度 (G_s) 在 30 °C 时出现峰值; 而蒸腾速率表现为随着温度增加而增加; Summer Queen 呼吸率的峰值在 35 °C, 而 Ruby Star 则出现在 40 °C, 表明温度会对百香果的光合作用产生影响。此外, Hiroshi 等^[5]还观察了温度对 14 个百香果杂交栽培品种花粉萌发的影响, 发现不同品种花粉萌化的最适温度不同, 杂交种 Minami-jujisei 最适萌发温度最高为 36 °C, *P. laurifolia* 的萌发温度在 26~28 °C 之间, 可见百香果对高温的耐受力存在种间差异。而当前鲜有关于田间持续高温对不同百香果品种开花坐果及光合作用影响的报道, 而综合评价持续高温条件对不同百香果品种的开花坐果特性和光合作用差异对于科学调整百香果夏季种植布局 and 高效筛选耐高温品种育种材料具有重要的指导意义。团队于 2022 年夏季日持续高温时段 (日最高温 >32 °C 不少于 5 天) 分别到南宁和贵港的百香果种植基地开展钦蜜 9 号、小黄金、台农 1 号和满天星的开花坐果特性观测工作, 同时对百香果叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 等光合参数进行测定。明确持续高温条件下 4 个百香果品种的开花坐果及光合作用差异, 旨在评价 4 个百香果品种的耐热性, 同时探讨持续高温条件下百香果开花坐果和光合作用之间是否存在关联性, 为不同百香果品种耐热性评价、未来耐高温育种材料快速筛选和广西百香果夏季种植布局提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 百香果种植基地及气象信息

选择广西主栽的品种钦蜜 9 号、小黄金、台农 1 号和满天星进行测试, 南宁百香果种植基地位于广西壮族自治区农业科学院里建科学研究基地 (北纬 23°, 东经 18°), 贵港基地百香果种植基地位于贵港市港北区庆丰镇 (北纬 23°, 东经 109°)。两地的百香果苗均为正规苗圃繁育的健康果苗, 于当年 3 月中上旬定植, 后期采用相同的栽培管理方式。两地属亚热带季风气候, 年均温 21~27 °C, 年降水量 1100~1500 mm。

图 1 是 2022 年 7 月南宁和贵港的气温数据。由图可知, 从 7 月 9 日起两地的日最高温均超过 32 °C, 并持续到月底。选择 7 月 27 日—31 日分别到南宁、贵港种植基地开展持续高温对 4 种百香果开花坐果及光合作用影响的调查。



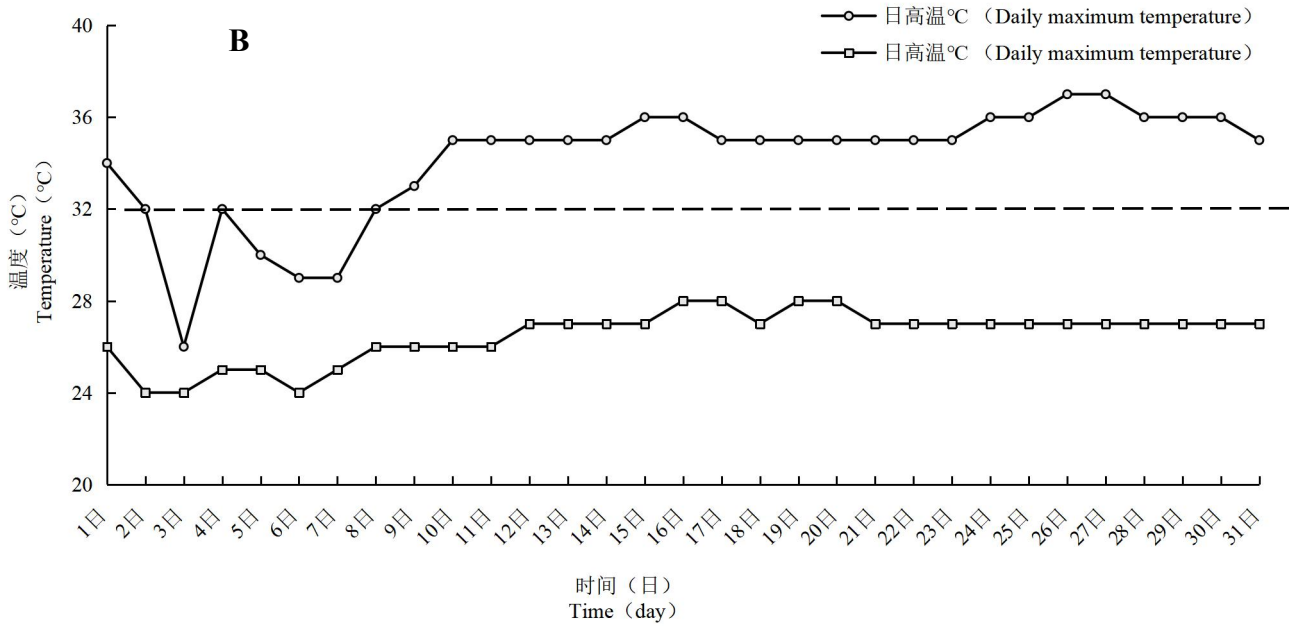


图 1 2022 年 7 月南宁 (A) 和贵港 (B) 日最高温和最低温变化图

Fig.1 Daily maximum and minimum temperature of Nanning(A) and Guigang(B) in July 2022

1.2 持续高温条件下 4 个百香果品种开花坐果的习性观测

采用四点取样法，分别在对角线分割的 4 个区域中心随机选取 5 株健康、长势一致的百香果植株 4 个生长方向的结果枝进行观测。理论上百香果结果枝每个枝节的芽点都能分化出一个花芽，分别记录 4 个品种百香果每条结果枝的枝条芽点数 (N_{Bp})、花朵数 (N_F ，包括花苞)、花芽数 (N_B) 和挂果数 (N_{Fr})，然后计算单株平均枝条芽点数 (V_{NBp})、单株平均花朵数 (V_{NF})、单株平均花芽数 (V_{NB})、单株平均挂果数 (V_{NFr}) 和平均花芽分化率 (R_{NBD})。

1.3 持续高温条件下 4 个不同百香果光合作用的测定

选择晴朗无风天气，利用 LI-6400XT 便携式光合作用测量系统(LI-COR，美国) 测定百香果的叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r) 等参数。测定时，利用光合测定仪自配光源和内置式 CO_2 钢瓶分别提供光源和气源，设置光强为 $1000 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ，控制 CO_2 浓度(C_a)为 $400.00 \mu mol \cdot mol^{-1}$ 。分别在对角线分割的 4 个区域中心随机选取 5 株健康、长势一致的植株进行测试。高温条件下 4 个百香果品种光合作用时间规律实验：选择日最高温超过 $32 \text{ }^\circ C$ 的晴朗天气到南宁的百香果种植基地开展实验，分别在 10 点、12 点、14 点和 16 点对 4 个百香果品种光合作用进行测试。根据测试结果，选择 4 个百香果品种叶片的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 数值相对较高及稳定的时间进行持续高温条件对百香果光合作用影响实验的测试时间点。持续高温对不同品种百香果光合作用的影响实验：待测株每株选取 4 个生长方向的结果枝上的 3 片完全伸展的叶片（一般为顶叶顺数 4~7 叶位的叶片）进行测试，利用公式计算气孔限制值 (L_s) 和水分利用效率 (WUE) [6-7]。

1.4 计算与统计分析

计算公式如下：

单株平均枝条芽点数 V_{NBp} (节/株) = 枝节总数 ÷ 调查株数；

单株平均花朵数 V_{NF} (朵/株) = 花朵总数 ÷ 调查株数;

单株平均花芽数 V_{NB} (个/株) = 花芽总数 ÷ 调查株数;

单株平均挂果数 V_{NFr} (朵/株) = 挂果数 ÷ 调查株数;

平均花芽分化率 R_{NBD} (%) = (平均花朵数 + 平均花芽数 + 平均挂果数) ÷ 平均枝节数 × 100;

气孔限制值 (Ls) = $1 - C_i \div C_a$ (C_a : 大气二氧化碳浓度);

水分利用效率 (WUE) = P_n / T_r 。

利用 Excel 2010 和 IBM SPSS 18.0 软件对数据进行整理和统计分析。利用 Pearson 法分析持续高温条件下百香果开花坐果与光合作用之间是否存在相关性。Excel 2010 绘制柱状图和折线图, 利用 GraphPad prism 8 绘制 Y 轴截断折线图。

2 结果与分析

2.1 持续高温对百香果花芽分化及坐果的影响

表 1 是持续高温对 4 个百香果品种开花结果影响的观测结果。由表可知, 持续高温条件下两个基地 4 种百香果的开花坐果优劣排序为钦蜜 9 号 > 小黄金 > 台农 1 号 > 满天星。南宁基地钦蜜 9 号的平均挂果数和小黄金的平均枝节数显著高于贵港基地 ($p < 0.05$); 与南宁基地相比, 贵港基地钦蜜 9 号的平均花朵数和平均花芽数分别多出 2.05 朵/株、3.2 朵/株, 而平均花芽分化率高出 6.79%, 差异显著 ($p < 0.05$); 台农 1 号和满天星的开花坐果不存在产地差异。进一步比较发现, 同一产区台农 1 号和满天星的开花坐果不存在显著差异, 但是均显著小于钦蜜 9 号和小黄金 ($p < 0.05$)。其中南宁基地钦蜜 9 号的平均枝节数、平均花朵数、平均花芽数和平均挂果数分别是台农 1 号的 1.2 倍、10.47 倍、5.26 倍和 5.95 倍, 是满天星的 1.17 倍、13 倍、5.58 倍和 8.93 倍; 小黄金的平均枝节数、平均花朵数、平均花芽数和平均挂果数分别是台农 1 号的 1.16 倍、2.25 倍、2.23 倍和 1.19 倍, 是满天星的 1.13 倍、2.79 倍、2.23 倍和 1.79 倍。贵港基地钦蜜 9 号的平均枝节数、平均花朵数、平均花芽数和平均挂果数比台农 1 号多 7.7 节/株、19.25 朵/株、18.5 个/株和 4.3 个/株, 比满天星多 9.75 节/株、19.2 朵/株、18.85 个/株和 4.6 个/株; 而小黄金的平均枝节数、平均花朵数、平均花芽数和平均挂果数比台农 1 号高 4.5%、215%、116.13% 和 41.18%, 比满天星高 8%、205.88%、143.64% 和 118.18%。以上结果表明持续高温条件下钦蜜 9 号比其余 3 个品种具有更好的耐热性, 且能维持较高的开花坐果性。

表 1 南宁和贵港基地 4 种百香果开花坐果调研结果

Fig. 1 Investigation result of Passion fruit orchards in Nanning and Guigang

基地所在地 Cultivation base	百香果品种 Varieties of passion fruits	平均枝节数	平均花朵数	平均花芽数	平均挂果数	平均花芽化率
		(节/株) Average number of branches (nodes/plant)	(朵/株) Average number of flowers (flowers/plant)	(个/株) Average number of Flower buds (buds/plant)	(个/株) Average number of fruits (fruits/plant)	(%) Average flower bud differentiation rate (%)
南宁	钦蜜 9 号 Qinmi NO.9	71.85±1.68 ^a	18.85±1.56 ^b	18.40±2.11 ^b	6.25±0.55 ^a	60.49±3.47 ^b
	小黄金	69.80±2.17 ^a	4.05±0.66 ^c	7.35±0.53 ^b	1.25±0.53 ^c	18.16±2.35 ^c

(Nanning)	Xiaohuangjin					
	台农 1 号	60.10 ± 3.29 ^c	1.80 ± 0.59 ^d	3.50 ± 0.74 ^c	1.05 ± 0.30 ^c	10.60 ± 1.73 ^d
	Tainong NO.1					
	满天星	61.60 ± 1.07 ^c	1.45 ± 0.53 ^d	3.30 ± 0.70 ^c	0.70 ± 0.35 ^c	8.84 ± 1.55 ^d
	Mantianxing					
	钦蜜 9 号	71.00 ± 2.78 ^a	20.90 ± 1.16 ^a	21.60 ± 1.67 ^a	5.15 ± 0.90 ^b	67.28 ± 6.09 ^a
贵港 (Guigang)	Qinmi NO.9					
	小黄金	66.15 ± 1.96 ^b	5.20 ± 1.26 ^c	6.70 ± 0.26 ^b	1.20 ± 0.59 ^c	19.82 ± 1.77 ^c
	Xiaohuangjin					
	台农 1 号	63.30 ± 2.28 ^{bc}	1.65 ± 0.44 ^d	3.10 ± 0.66 ^c	0.85 ± 0.19 ^c	8.90 ± 1.93 ^d
	Tainong NO.1					
	满天星	61.25 ± 2.12 ^c	1.70 ± 0.48 ^d	2.75 ± 0.66 ^c	0.55 ± 0.25 ^c	8.19 ± 1.06 ^d
	Mantianxing					

2.2 持续高温条件对 4 个百香果品种光合作用的影响

2.2.1 高温条件下 4 个百香果品种的光合作用时间规律

高温条件下 4 个百香果品种的光合作用时间规律的测定结果见图 2。测定过程中，小黄金的 G_s 和满天星的 C_i 在 10 时出现测定异常，且 4 个百香果品种的光合作用参数在此时均处于较低值。12 时—16 时，4 个百香果品种的 T_r 波动幅度较小，其他光合作用参数均表现为先上升到 14 时达到峰值后下降的趋势。其中小黄金和满天星的 P_n 、 G_s 和 C_i 在 14 时达到峰值后呈急剧下降的趋势；钦蜜 9 号的 P_n 在 14 时达到峰值后缓慢下降，而 G_s 和 C_i 表现与小黄金相同；台农 1 号的 P_n 、 G_s 和 C_i 在 14 时达到峰值后变动幅度较小。为确保高温条件下 4 个百香果品种的光合作用参数稳定且均处于高水平，综合分析测试结果，选择 12—14 点作为持续高温对钦蜜 9 号和小黄金光合作用影响的适宜测定时段；选择 14 点作为持续高温对满天星光合作用影响的适宜测定时段；选择 14—16 点作为持续高温对台农 1 号光合作用影响的适宜测定时段。4 个品种的野外测定顺序为钦蜜 9 号—小黄金—满天星—台农 1 号。

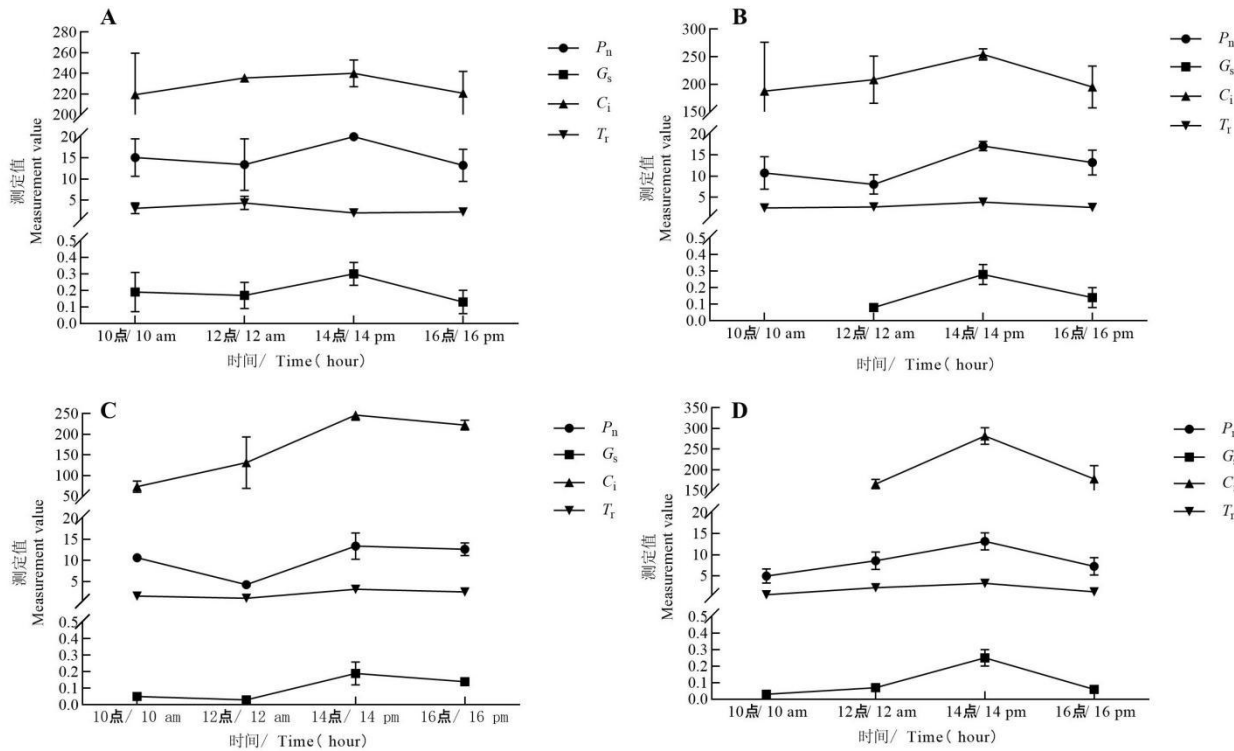


图2 高温条件下4个百香果品种的光合作用时间规律

A: 钦蜜9号; B: 小黄金; C: 台农1号; D: 满天星

Fig.2 Time regularity of photosynthesis in 4 passion fruit species under high temperature

A: Qinmi NO.9; B: Xiaohuangjin; C: Tainong NO.1; D: Mantianxing

2.2.2 持续高温条件对4个百香果品种光合作用的影响

图3是持续高温条件下两个种植基地4个百香果品种光合作用的测定结果。由图可知，除了贵港种植地台农1号的 C_i 显著高出南宁基地 $31.83 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ，满天星 P_n 显著低于南宁 $2.03 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($p < 0.05$)，持续高温条件下其他同种百香果品种的光合作用不存在地域差异，但品种间存在显著差异 ($p < 0.05$)。分析发现，4个光合作用参数均为钦蜜9号最高，随后是小黄金和台农1号，最低的是满天星。南宁基地钦蜜9号的光合作用参数显著高于其他品种 ($p < 0.05$)，其中 P_n 为 $21.16 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 分别比小黄金、台农1号和满天星高出 $6.78 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $11.32 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $13.33 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ； G_s 分别比小黄金、台农1号和满天星高出 $0.19 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $0.26 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 和 $0.32 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ； C_i 比小黄金高18.14%，比台农1号高58.67%，是满天星高5倍； T_r 分别是小黄金的3倍、台农1号的3.8倍、满天星的6.1倍。贵港基地4个百香果品种的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 的变化范围分别为 $5.80 \sim 20.95 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $0.03 \sim 0.34 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、 $43.27 \sim 232.17 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ 和 $1.24 \sim 8.19 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。通过光合作用测定结果可知，持续高温条件下钦蜜9号仍保持较高的光合作用能力。

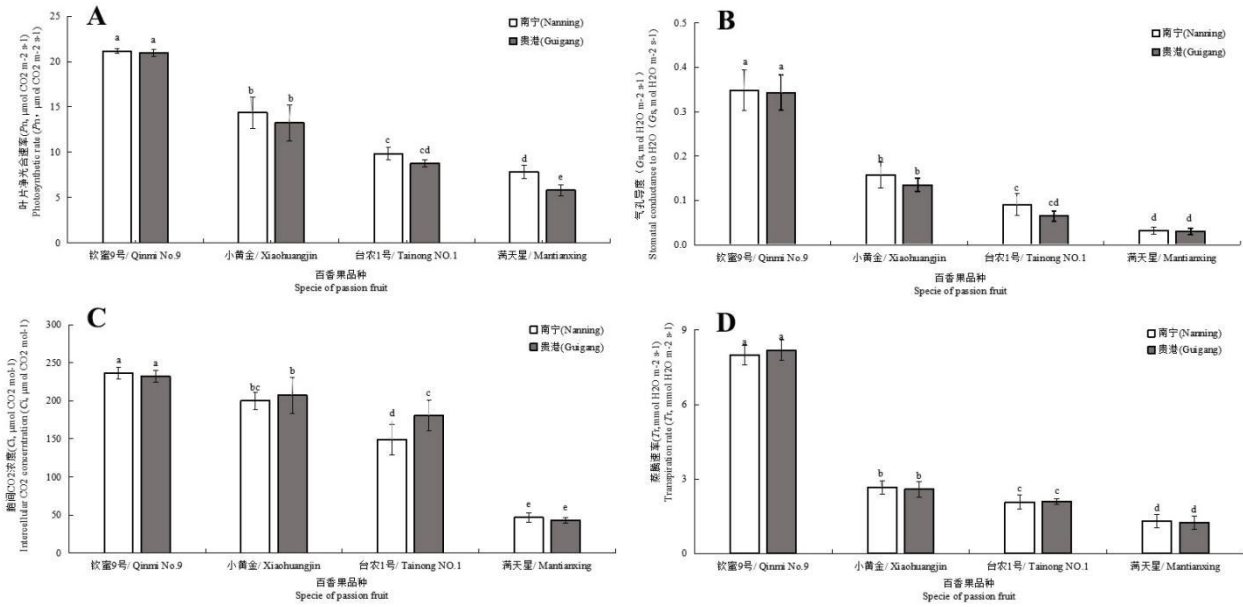


图3 持续高温条件下南宁、贵港种植基地4个百香果品种光合作用

A: 净光合速率; B: 气孔导度; C: 胞间 CO_2 浓度; D: 蒸腾速率

Fig.3 Photosynthetic performance of 4 passion fruit species in Nanning and Guigang planting bases under continuous high temperature

A: Photosynthetic rate (P_n); B: Stomatal conductance (G_s); C: Intercellular CO_2 concentration (C_i); D: transpiration rate (T_r);

通过计算可知南宁和贵港种植基地4个百香果品种的 L_s 变化规律与 C_i 相反,且品种之间存在显著差异 ($p < 0.05$),结果见图4。南宁和贵港基地百香果品种 L_s 值最高的为满天星都达到0.89,其次是台农1号和小黄金,而最低的是钦蜜9号,仅有0.41。持续高温条件下,南宁基地 WUE 最高的也是满天星,达到 $6.06 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,比小黄金和台农1号分别高出 $0.67 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 和 $1.25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,最低的是钦蜜9号仅为 $2.65 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 。而贵港种植基地最高的是小黄金达 $5.11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,其次是满天星的 $4.76 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 和台农1号的 $4.21 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$,最低的是仅有 $2.56 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ 的钦蜜9号。说明持续高温条件下钦蜜9号与其他4个品种相比具有更强的气体交换能力,而满天星会有更强的水分利用。

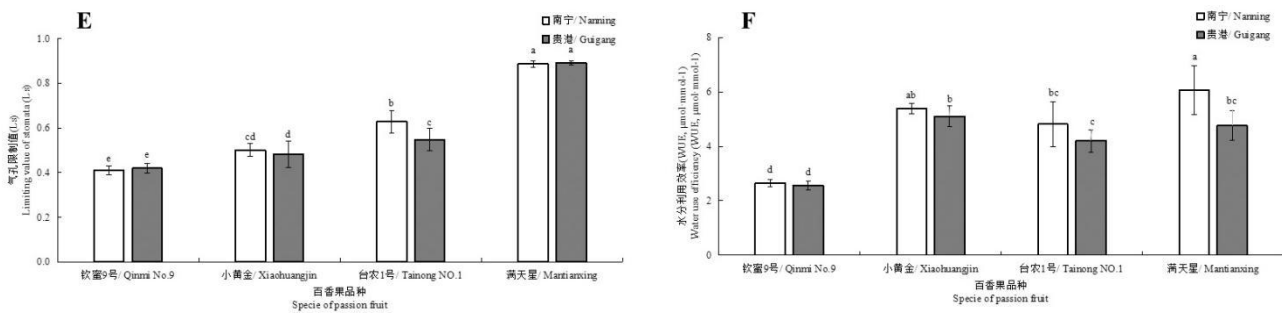


图4 持续高温条件下种植基地4个百香果品种光合特征参数

E: 气孔限制值 (L_s); F: 水分利用效率 (WUE)

Fig.4 Photosynthetic characteristics of 4 passion fruit species in planting bases under continuous high temperature

E: Limiting value of stomata (Ls); F: Water use Efficiency (WUE)

2.3 高温条件下百香果开花坐果特性与光合作用相关性分析

由表 2 可以看出持续高温条件下 4 个百香果品种平均枝节数、平均花朵数、平均挂果数和平均花芽数与 4 个光合作用参数之间呈极显著正相关 ($p < 0.01$)。其中, 平均花朵数和平均花芽数与 P_n 、 G_s 、 T_r 的相关系数超过 0.9, 平均挂果数与 G_s 、 T_r 的相关系数超过 0.9。表明持续高温下高水平光合作用可能与百香果开花坐果具有密切的关系。

表 3 高温条件下不同百香果种质开花坐果与光合作用的相关系数 (n=32)

Tab. 3 Correlation coefficients between photosynthesis and production traits in 4 passion fruit species under high temperature (n=32)

光合参数 Parameters of photosynthesis	平均枝节数 Average number of branches	平均花朵数 Average number of flowers	平均花芽数 Average number of Flower buds	平均挂果数 Average number of fruits
P_n	0.83**	0.926**	0.938**	0.890**
G_s	0.08**	0.962**	0.971**	0.932**
C_i	0.698**	0.660**	0.681**	0.624**
T_r	0.761**	0.981**	0.969**	0.965**

在0.01水平 (双侧) 上显著相关。Note:There was a significant association at 0.01 level (bilateral)

3 讨论

植物生殖阶段出现高温气候会导致花芽发育过快, 雌、雄蕊及花瓣畸形, 是影响产量的主要限制因素之一^[8-10]。纠松涛等^[11]研究发现花期甜樱桃出现超高温会影响整个开花过程的柱头的可授性。张祖建等^[12]发现当抽穗期处于 39 °C 的高温环境下, 杂交稻的受精率接近于零。胡秋倩等^[13]同样发现高温会影响水稻花粉结构、发育、代谢水平及活性物质含量, 进而造成颖花不育。还有报道称番茄植株在平均温度为 34 °C/19 °C 的长时间高温胁迫下, 花落率下降 34%, 结实率下降 71%, 主要原因在于热胁迫下番茄花粉粒发生损伤^[14]。本研究比较持续高温条件下南宁贵港种植基地的 4 个百香果品种开花坐果特性发现, 小黄金、台农 1 号和满天星的花芽分化率只有 8.84%~18.15%, 挂果数在 0.7~1.25 个之间, 相比之下钦蜜 9 号的花芽分化率和挂果数分别为 60.49%和 6.25 个, 表明高温条件对影响百香果的花器官分化、发育及授粉产生影响。而钦蜜 9 号开花坐果特性比其他 3 个品种更优异, 因此可以考虑使用钦蜜 9 号作为夏季果市场的主要种植品种以保证夏季水果市场中百香果的占有率。

光合作用作为植物生命周期中重要的生理过程, 对温度变化敏感, 本研究同步探讨持续高温条件对 4 个百香果品种光合作用发现, 香果品种的光合作用参数存在显著差异 ($p < 0.05$), 南宁、贵港两地的 4 个光合作用参数大小排序为: 钦蜜 9 号 > 小黄金 > 台农 1 号 > 满天星。研究表明, 高温对植物的植物光合作用的影响包括气孔限制因素和非气孔限制因素^[15-17], 其中气孔限制因素强调植物光合作用的下降的主因是由于 G_s 降低, 导致 CO_2 供给不足造成从而降低光合作用; 而非气孔限制因素偏重高温抑制光合作用过程的关键酶活性, 进而对光合作用产生影响^[18-20]。Farquhar 和 Sharkey^[21]指出当 P_n 和 C_i 变化方向一

致，而 G_s 下降时，认为光合速率的下降主要是由 G_s 变化引起。由分析结果可以看出，南宁种植基地 4 个百香果品种的 P_n 和 C_i 变化趋势一致， P_n 与 G_s 变化趋势也一致，可以判断当前 4 个百香果品种调节光合作用强弱属于气孔限制因素。而贵港种植基地 4 个百香果品种的光合参数变化趋势虽然与南宁种植基地的相似，值得注意的是，贵港基地小黄金和台农 1 号的 P_n 和 G_s 与南宁基地相比有所降低，但 C_i 增加，说明两者细胞内的 CO_2 没有得到充分利用，此时 P_n 降低可能存在非气孔限制因素，分析原因可能在于 7 月贵港高温天气持续时间及强度高于南宁所致，小黄金和台农 1 号在持续高温条件下光合作用的调控机制还需要进一步研究讨论。通过计算发现，持续高温条件下钦蜜 9 号的 L_s 和 WUE 显著低于其他品种，表明高温条件下钦蜜 9 号具有更强的气孔调节能力，并能可能通过增强蒸腾作用进行散热以抵抗高温对植株的伤害。

早期研究指出光合速率的大小与作物的产量和品质息息相关，李欣欣等^[22]分析了 5 个油橄榄品种的叶片生理特征及开花座果率关系发现，结果枝叶片光合作用强弱会影响橄榄的开花座果率。朱雨晴等^[23]发现番茄产量与遮阴日数呈负相关，表明光合作用变化会对番茄的产量产生影响，类似的研究结果在香梨^[24]、辣椒^[25-26]和核桃^[27]中均有报道。分析持续高温条件下 4 个百香果品种开花坐果特性及光合作用之间的相关性发现，南宁贵港两地 4 个百香果品种的开花坐果习性与光合作用参数之间呈极显著正相关，其中花朵数和花芽数与 P_n 、 G_s 、 T_r ，挂果数与 G_s 、 T_r 的相关系数超过 0.9，表明持续高温下维持高水平光合作用对百香果花的分化和发育具有一定积极作用，因此未来百香果耐热品种选育可以考虑将光合作用作为筛选指标之一，以提升耐热材料育种材料筛选效率。但是持续高温条件下不同百香果品种开花坐果与光合作用的潜在相互作用机制还需要深入探讨。

4 结论

广西当前的栽培品种中，钦蜜 9 号在持续高温条件下仍具有较高的开花和坐果率，且能维持较高水平的光合作用，表明钦蜜 9 号具有较好的耐热性，可作为夏季主栽品种在全广西推广种植或与其他品种配套种植，以改善其他品种百香果由于夏季高温产量降低导致市场萎缩，提升广西百香果主产区优势，同时可以将其作为耐热育种的亲本材料。此外，可将钦蜜 9 号优异的耐热性及高产优势的潜在作用机理研究可作为未来百香果耐热育种研究的重要方向之一，以丰富我国百香果优质耐热种质资源数量。

参考文献 References:

[1]邢相楠, 黄永才, 陈格, 刘茂, 黄伟华, 桂杰, 郑德波, 罗献宝, 杨柳. 广西百香果产业发展现状、存在问题及对策建议[J]. 南方农业学报, 2020, 51(05): 1240-1246.

XING Xiangnan, HUANG Yongcai, CHEN Ge, LIU Mao, HUANG Weihua, GUI Jie, ZHENG Debo, LUO Xianbao, YANG Liu. Current status, existing problems and development suggestions of Guangxi passion fruit industry. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(05): 1240-1246.

[2]黄诚梅, 罗海斌, 黄永才, 魏源文, 杨柳, 吴兴剑, 叶丽萍, 曹辉庆, 蒋胜理. ‘满天星’西番莲花芽分化与坐果期生理代谢效应[J]. 热带农业科技, 2021, 44(03): 26-31.

HUANG Chengmei, LUO Haibin, HUANG Yongcai, Wei Yuanwen, YANG Liu, WU Xingjian, YE Liping, CAO Huiqing, JIANG Shengli. Physiological effect of high temperature on flower bud differentiation and fruit setting of ‘Mantianxing’ *Passiflora edulis*[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2021, 44(03): 26-31.

[3]田青兰, 吴艳艳, 黄伟华, 刘洁云, 韦绍龙, 牟海飞, 韦弟, 黄永才, 熊晓兰, 张英俊. ‘台农1号’西番莲的成花坐果特性及与气象因子的关系[J]. 果树学报, 2020, 37(09):1358-1370.

TIAN Qinglan, WU Yanyan, HUANG Weihua, LIU Jieyun, WEI Shaolong, MOU Haifei, WEI Di, HUANG Yongcai, XIONG Xiaolan, ZHANG Yingjun. Flower formation and fruit setting in ‘Tainong No.1’ passion fruit and its relationship with meteorological factors[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(09): 1358-1370.

[4]Atsushi S, Tatsuya K, Shigeto T, Masashi Y. Effect of temperature on photosynthesis characteristics in the passion fruits ‘Summer Queen’ and ‘Ruby Star’[J]. The Horticulture Journal, 2017, 86(02): 194-199.

[5]Hiroshi M, Tatsushi O. Varietal differences in thermal response of passion fruit pollen germination[J]. Trop Agr. Develop, 2020, 64(02): 90-96.

[6]罗青红, 史彦江, 宋锋惠, 寇云玲, 韩强. 盐碱地杂交榛光合作用日变化及其与环境因子的关系[J]. 果树学报, 2013, 30(04): 627-633.

LUO Qinghong, SHI Yanjiang, SONG Fenghui, KOU Yunling, HAN Qiang. Diurnal dynamics on photosynthetic parameters of hybrid hazel in saline-alkali land and its relation to environmental factors[J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(04): 627-633.

[7]宋锋惠, 罗青红, 史彦江, 俞涛, 寇云玲. 新疆杂交榛良种光合作用对生态因子的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(05): 1148-1154.

SONG Fenghui, LUO Qinghong, SHI Yanjiang, YU Tao, KOU, Yunling. Photosynthetic responses of hybrid hazel fine breeds to ecological factors in Xinjiang, Northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(05): 1148-1154.

[8]Ahmad M, Waraich E A, Tanveer A, Anwar-ul-Haq M. Foliar applied thiourea improved physiological traits and yield of camelina and canola under normal and heat stress conditions[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(02): 1666 - 1678.

[9]Telfer P, Edwards J, Bennett D, Ganesalingam D, Able J, Kuchel H. A field and controlled environment evaluation of wheat (*Triticum aestivum*) adaptation to heat stress[J]. Field Crops Research, 2018, 229: 55 - 65.

[10]徐滔杞, 陈奇凌, 吴翠云. 花期高温对果树花器官发育、生殖及生理机制的影响[J]. 北方果树, 2022, (05): 1-4.

XU Taoqi, CHEN Qiling, WU Cuiyun. Effects of high temperature stress flowering on flower organ development, reproduction and physiological mechanism of fruit trees[J]. Northern Fruits, 2022, (05): 1-4.

[11]纠松涛, 徐岩, 付朝斌, 刘勋菊, 王世平, 张才喜. 花发育阶段以及温度对不同品种甜樱桃柱头可授性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(10): 1698-1705.

Jiu Songtao, XU Yan, FU Chaobin, LIU Xunju, WANG Shiping, ZHANG Caixi. Effect of flower phenology and temperature on stigma receptivity in Sweet Cherries[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(10): 1698-1705.

[12]张祖建, 王晴晴, 郎有忠, 王春哥, 朱庆森, 杨建昌. 水稻抽穗期高温胁迫对不同品种受粉和受精作用的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(02): 273-282.

ZHANG Zujian, WANG Qingqing, LANG Youzhong, WANG Chungu, ZHU Qingsen, YANG Jian-Cchang. Effects of high temperature stress at heading stage on pollination and fertilization of different types of rice variety[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(02): 273-282.

[13]胡秋倩, 闫娜, 崔克辉. 水稻颖花育性的高温伤害机理及其栽培调控措施[J]. 植物生理学报, 2020, 56(06): 1177-1190. HU Qiuqian, YAN Na, CUI Kehui. High temperature injury on spikelet fertility and its regulation in rice[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(06): 1177-1190.

[14]Vijayakumar A, Beena R. Impact of temperature difference on the physicochemical properties and yield of tomato: a review[J]. Chemical Science Review and Letters, 2020, 9(35): 665-681.

[15]杜尧东, 李键陵, 王华, 唐湘如, 胡飞. 高温胁迫对水稻剑叶光合和叶绿素荧光特征的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2541-2548.

DU Yaodong, LI Jianling, WANG Hua, TANG Xiangru, HU Fei. Effects of high temperature stress on the flag leaf photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of rice[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2541-2548.

[16]吴思政, 梁文斌, 聂东伶, 柏文富, 沈素贞, 李建挥, 禹霖. 高温胁迫对不同蓝莓品种光合作用的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 1-8.

WU Sizheng, LIANG Wenbin, NIE Donglin, BAI Wengfu, SHEN Suzhen, LI Jianhui, YU Lin. Effects of high temperature stress on photosynthesis of different blueberry varieties[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(11): 1-8.

[17]练冬梅, 李洲, 姚运法, 张少平, 林碧珍, 洪建基, 赖正锋. 干旱和盐胁迫对冰菜生长及光合特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(04): 118-123.

LIAN Dongmei, LI Zhou, YAO Yunfa, ZHANG Shaoping, LIN Bizhen, HONG Jianji, LAI Zhengfeng. Effect of drought and saline stress on the growth and photosynthetic characteristics of *Mesembryanthemum crystallinum* Linn.[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(04): 118-123.

[18]孙胜楠, 王强, 孙晨晨, 刘丰娇, 毕焕改, 艾希珍. 黄瓜幼苗光合作用对高温胁迫的响应与适应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(05): 1603-1610.

SUN Shengnan, WANG Qiang, SUN Chenchen, LIU Fengjiao, BI Huangai, AI Xizhen. Response and adaptation of photosynthesis of cucumber seedlings to high temperature stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(05): 1603-1610.

[19]王莹博, 许申平, 马杰, 崔波. 高温干旱胁迫对白及光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(02): 199-205.

WANG Yingbo, XU Shenping, MA Jie, CUI Bo. Effects of heat and drought stress on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Bletillastriata*[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(02): 199-205.

[20]左应梅, 张金渝, 杨天梅, 杨绍兵, 杨维泽, 李纪潮, 杨美权, 许宗亮, 简邦丽. 温度胁迫对三七光合特性及生理指标的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(12): 2145-2151.

ZUO Yingmei, ZHANG Jinyu, YANG Tianmei, YANG Shaobing, YANG Weize, LI Jichao, YANG Meiquan, XU Zongliang, Jian Bangli. Effects of temperature stress on photosynthetic characteristics and physiological indexes of *Panax notoginseng* (Burk.) F.H.Chen[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(12): 2145-2151.

[21]Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual review of plant physiology, 1982, 33(1): 317-345.

[22]李欣欣, 叶敏, 王丽华, 慕长龙, 邓小兵, 王泽亮, 杜晋城. 3个生态区域内5个油橄榄品种的叶片生理特征及开花座果率研究[J]. 西部林业科学, 2022, 51(01): 49-55+94.

LI Xinxin, YE Min, WANG Lihua, MU Changlong, DENG Xiaobing, WANG Zeliang, DU Jincheng. Leaf physiological characteristics, flowering and fruit rate of five *Olea europaea* species in three ecological regions[J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(01): 49-55+94.

[23]朱雨晴, 薛晓萍. 不同遮阴日数对花果期番茄开花坐果特性的影响[J]. 干旱气象, 2020, 38(05): 820-827.

ZHU Yuqing, XUE Xiaoping. Effect of shading days on flowering and fruit setting characteristics of tomatoes at flowering and fruiting stages[J]. Journal of Arid Meteorology, 2020, 38(05): 820-827.

[24]牛莹莹, 廖康, 赵世荣, 贾杨, 彭晓莉, 庞洪翔, 江振斌. 不同栽植密度库尔勒香梨树冠结构及产量品质差异分析[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(8): 1425-1431.

NIU Yingying, LIAO Kang, ZHAO Shirong, JIA Yang, PENG Xiaoli, PANG Hongxiang, JIANG Zhenbin. Analysis of the differences of the crown structure, yield and quality of different planting densities in Korla fragrant pear[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(8): 1425-1431.

[25]邹学校, 马艳青, 刘荣云, 张竹青, 陈文超, 戴雄泽, 周群初, 李雪峰. 辣椒净光速率与农艺性状间的关联性研究[J].

西南农业学报, 2006, (02): 270-275.

ZOU Xuexiao, MA Yanqin, LIU Rongyun, ZHANG Zhuqin, CHENG Wenchao, DAI Xiongze, ZHOU Chunchu, LI Xuefeng . Study of relationa between net photosynthesis rate and agronomic character in pepper (*Capsicum annuum*-L)[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006, (02): 270-275.

[26]关志华, 王太航, 王陆州, 赵唯唯, 陈双臣, 王忠红. 藏东南 15 个辣椒地方品种开花结果期的光合——光响应特性[J]. 高原农业, 2018, 2(02): 118-125+157.

GUAN Zhihua, WANG Taihang, WANG Luzhou, ZHAO Weiwei, CHEN Shuangchen, WANG Zhonghong. Photosynthetic-light response characteristics of 15 local pepper varieties in the flowering fruit period from southeastern Tibet[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2018, 2(02): 118-125+157.

[27]任佳星. 核桃结果枝营养生长与光合能力对其开花结果的影响[D]. 新疆农业大学, 2020.

REN Jiaying. Effects of walnut fruiting branch vegetative growth and photosynthetic on its flowering and fruiting[D]. Xinjiang Agricultural University, 2020.