

光照强度对厚皮甜瓜糖分积累与蔗糖代谢相关酶的影响

任 雷, 胡晓辉, 杨振超, 邹志荣, 李鹏飞

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】** 研究不同光照强度对厚皮甜瓜中3种糖分积累与4种蔗糖代谢相关酶活性的影响, 以期找到适合秋冬茬甜瓜生长的光照强度。**【方法】** 以“一品天下 108”厚皮甜瓜品种为试材, 在温度相同的日光温室隔间中, 分别设置自然光照、自然光照+补光 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和自然光照+补光 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 3个处理, 分别于花后7, 14, 21, 28, 35, 42 d 采摘甜瓜果实, 研究不同光照强度对甜瓜果实磷酸蔗糖合成酶(SPS)、蔗糖合成酶(SS)、中性转化酶(NI)、酸性转化酶(AI)活性及蔗糖、果糖、可溶性糖积累的影响。**【结果】** 光照越强的处理, 厚皮甜瓜果实中果糖、可溶性糖含量和2个转化酶活性越高; 在花后7~21 d, 光照越强的处理, 厚皮甜瓜果实中蔗糖含量越低, 但在花后28~42 d, 光照最强的处理, 果实中蔗糖含量却最高; SPS活性在厚皮甜瓜果实发育过程中呈波动变化, 光照最强处理的果实中SPS活性随果实的成熟总体呈升高趋势; 自然光照处理中, SS活性在果实发育过程中呈波动变化, 2个补光处理果实中的SS活性变化趋势较一致, 即在花后7~21 d 活性较低, 花后28~42 d 活性明显升高。**【结论】** 补光程度达到某一阈值后, 才会对甜瓜果实糖分积累和蔗糖酶活性的变化有较大影响。就本试验而言, 冬季补光 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的效果不明显, 补光 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 即可获得较为明显的效果。

【关键词】 厚皮甜瓜; 光照强度; 糖分积累; 蔗糖代谢酶

【中图分类号】 S652. 901

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)06-0120-07

Effects of light intensity on sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzymes in muskmelon

REN Lei, HU Xiao-hui, YANG Zhen-chao, ZOU Zhi-rong, LI Peng-fei

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** This experiment was carried out to elucidate the effects of different light intensities on sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzymes in muskmelon. **【Method】** With Yipintianxia 108 as the experimental material, the changes of sugar accumulation and activities of enzymes related to sucrose metabolism in the development of muskmelon fruits under three different light conditions, the natural light, natural light+ $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ and natural light+ $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ in a greenhouse with the same temperature were studied. **【Result】** The results show that the stronger the light is, the higher the fructose and soluble sugar content in the fruits are, while the activity of zymose also increases with the increase in light intensity; During 7—21 d after pollination, the stronger the light is, the higher the sucrose content in the fruits are; During 28—42 d after pollination, the sucrose content in the fruits is the highest which are cultivated in the strongest light treatment; Sucrose phosphate synthase activities fluctuate in the whole

* [收稿日期] 2009-12-08

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2007BAD79B04)

[作者简介] 任 雷(1985—), 男, 河南洛阳人, 在读硕士, 主要从事设施内环境因素对栽培作物生长影响的研究。

E-mail: renleibao8@163.com

[通信作者] 邹志荣(1956—), 男, 陕西延安人, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺工程与技术研究。

E-mail: zouzhirong2005@163.com

phase, and in the strongest light treatment, the sucrose phosphate synthase activities have an upward trend as the fruits grow; In the natural light treatment, sucrose synthase activities in the fruits fluctuate as the fruits grow, while in those two light strengthened treatments, the sucrose synthase activities are low in 7—21 d after pollination, and then increase significantly during 28—42 d after pollination. 【Conclusion】 When the light intensity reaches a certain value, it exerts great impact on the sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzymes in muskmelon. In this experiment, natural light + $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ has an obvious effect while the effect of natural light + $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ is not significant.

Key words: muskmelon; light intensity; sugar accumulation; sucrose-metabolizing enzyme

光照强度是影响作物生长发育的一个重要因素,甜瓜(*Cucumis melo* L.)作为喜光类作物,对光照有更高的要求^[1]。甜瓜果实中糖的含量、种类和比率是决定果实品质的主要因素^[2],因而糖积累是甜瓜果实品质形成的关键,而蔗糖代谢又是糖积累的重要环节。探讨甜瓜果实糖积累及其组分变化的机理,对改善甜瓜品质具有重要意义。与蔗糖代谢密切相关的酶主要有磷酸蔗糖合成酶(PS)、蔗糖合成酶(SS)、中性转化酶(NI)和酸性转化酶(AI)。前人在桃^[3-6]、甜瓜^[7-8]、草莓^[9-10]、番茄^[11-12]、菠菜^[13]等作物上的研究表明,果实糖含量与蔗糖代谢相关酶之间存在密切关系。Hubbard 等^[14]提出,花后 15 d 甜瓜中蔗糖的大量积累,主要是 AI 活性下降和 PS 活性上升的结果。缪旻珉等^[15]和张明方等^[16]也证明,蔗糖代谢相关酶对蔗糖的积累具有一定作用。蔗糖代谢相关酶对环境条件很敏感,因此可以利用各种手段对环境条件进行有效调控^[17],以达到提高甜瓜果实品质的目的。目前,针对光照强度与甜瓜果实糖分积累和蔗糖相关酶代谢的研究还较少,为此,本试验在自然光照强度未达到甜瓜生长光饱和点时,通过补光灯来增加光照强度,测定不同光照强度下甜瓜果实中蔗糖、果糖和可溶性糖含量及 PS、SS、NI 和 AI 活性随果实发育的变化规律,在考虑经济投入的前提下,以期找到适合秋冬茬甜瓜生长的光照强度,并为进一步研究光照强度与甜瓜果实品质之间的关系奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试厚皮甜瓜品种为“一品天下 108”,种子由西北农林科技大学农城种业中心提供。

1.2 厚皮甜瓜幼苗的培育

甜瓜种子于 2008-12-20 播种于杨凌新天地双层充气塑料膜连栋温室内,当厚皮甜瓜苗长至四叶一心(2009-01-10)时,定植于西北农林科技大学北

校区园艺场的日光温室内。本试验栽培容器为直径 330 cm、高 220 cm 的塑料栽培盆,每盆定植 1 株,共种植 90 株。盆内土壤由园田土、草炭、腐熟牛粪按 5:2:1 的体积比混合配制而成,定植后常规管理。在约第 12 节处留子蔓结瓜,约保留 25 片叶处打顶,开花授粉后 42 d 采收。在厚皮甜瓜开花时统一进行光照处理。花后每 7 d 每个光照处理取 3 个长势较一致的果实,采摘后立即投入液氮速冻,然后转移至 -70 ℃ 冰箱保存备用。

1.3 方法

1.3.1 试验处理 在气温相同的条件下,通过增设农用补光灯的方法来达到增大光照强度的效果。补光灯统一选用飞利浦农用补光灯,功率 400 W。单灯距离厚皮甜瓜植株顶部 1.5 m,到达厚皮甜瓜植株的光合有效辐射(PAR)约为 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。每天上午 8:00—11:00,下午 16:00—18:00 进行补光,每天 9:00,11:00,16:00 和 18:00 用光量子计记录光照强度。

试验设自然光照(处理 A,光照强度变化于 $100 \sim 600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、自然光照 + $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (处理 B)和自然光照 + $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (处理 C)3 个光照强度处理,每个处理 30 株甜瓜苗。

1.3.2 厚皮甜瓜果实中糖分的测定 分别于开花授粉后 7,14,21,28,35,42 d 测定果实糖分,每处理每次选择 3 个果实分别测定。测定方法参考刘新建等^[18]的方法:每个果实称取 2 g 果肉,充分研磨后倒入 15 mL 试管,加入 10 mL 体积分数 80% 酒精,置于 80 ℃ 水浴振荡保温 30 min,冷却后,4 000 g 离心 3 min,收集上清液,残渣加入体积分数 80% 酒精重复提取 2 次,合并上清液。在上清液中加入 10 mg 活性碳,80 ℃ 脱色 30 min,定容至 25 mL,过滤后取滤液,然后通过蒽酮比色法测定可溶性糖、果糖和蔗糖含量,重复测定 3 次。

1.3.3 厚皮甜瓜果实中蔗糖酶活性的测定 酶提取及其活性测定的取样日期同上,测定方法主要采

用高俊凤^[19]的方法并加以改进。

(1)酶液提取。称取 2.0 g 甜瓜果肉,置于预冷的研钵中,分批加入 5 mL 提取缓冲液(100 mmol/L Tris-HCl(pH7.0)缓冲液,内含 5 mmol/L MgCl₂、2 mmol/L EDTA-Na₂、体积分数 2% 乙二醇、质量分数 0.2% BSA、质量分数 2% PVP、5 mmol/L DTT),冰浴研磨提取,2 ℃下 10 000 g 离心 20 min,取上清液 3 mL 装入透析袋中,置于透析缓冲液(25 mmol/L Tris-HCl(pH7.0)缓冲液,内含 2.5 mmol/L MgCl₂、1 mmol/L EDTA-Na₂、体积分数 1% 乙二醇、1 mmol/L DTT)中 4 ℃透析过夜,其间更换透析液 3 次,透析后酶液定容至 5 mL 备用。

(2)SPS 的测定。向 0.4 mL 100 mmol/L Tris-MES(pH7.0)反应体系(内含 10 mmol/L 果糖-6-磷酸、5 mmol/L 醋酸镁、5 mmol/L DTT)中加入 0.1 mL UDPG 和 0.05 mL 透析后酶液,补蒸馏水至 1 mL,于 30 ℃水浴中反应 10 min 后,沸水浴 3 min 中止反应,对照用蒸馏水代替 UDPG。然后加入 2 mol/L NaOH 0.1 mL,沸水浴 10 min 后冷却至室温。加体积分数 30% HCl 3.5 mL 和质量分数 0.1% 间苯二酚 1 mL,摇匀后 80 ℃保温 10 min,冷却后于 480 nm 处比色,测定蔗糖生成量。酶活性单位为“ $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ ”。

(3)SS 的测定。与 SPS 的测定方法类似,只是酶反应液中用 10 mmol/L 果糖代替果糖-6-磷酸。

(4)NI 的测定。向 0.95 mL 80 mmol/L 乙酸-K₃PO₄(pH7.0)反应体系(内含 50 mmol/L 蔗糖)中加入 0.05 mL 透析后酶液,30 ℃水浴反应 10 min,煮沸 3 min 中止反应。以煮死的酶液作对照。随后加 3,5-二硝基水杨酸试剂 1 mL,沸水浴 5 min,冷却至室温,于 540 nm 处比色测定生成的还原糖量。酶活性单位为“ $\mu\text{mol}/(\text{h}\cdot\text{g})$ ”。

(5)AI 的测定。测定方法与 NI 的测定方法类似,只是酶反应液 pH 值为 4.7。

1.3.4 数据处理 试验数据运用 Excel 及 DPS 软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 光照强度对厚皮甜瓜果实中糖分含量的影响

2.1.1 蔗糖 由表 1 可知,各光照处理下,甜瓜果实中蔗糖含量均随着果实的发育而不断增加。在开花后 7 d,各处理间果实蔗糖含量存在显著性差异,光照强度大的处理 C 果实中蔗糖含量最低;开花后 14~21 d,各光照强度处理的甜瓜果实内蔗糖含量无显著差异;从花后 28 d 开始,与自然光照处理(A)相比,处理 B 和 C 果实中的蔗糖含量随着补光量的增加而增加,其中花后 28 d,各处理之间均存在显著性差异,之后到成熟,各个处理间的蔗糖含量差异逐渐减小。光照对蔗糖含量影响最明显的阶段在花后 21~28 d。

表 1 不同光照强度处理下厚皮甜瓜果实中蔗糖含量随果实发育的变化

Table 1 Change of sucrose content in the melon fruit in different light intensity treatments		mg/g					
处 理 Treatment	花后时间/d Day after pollination						
	7	14	21	28	35	42	
A	2.25 a	3.01 a	3.04 a	5.16 c	39.50 b	60.83 ab	
B	1.75 b	2.64 a	2.84 a	6.45 b	40.84 ab	58.59 b	
C	1.25 c	2.47 a	2.59 a	8.03 a	41.24 a	63.75 a	

注:同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note:The different letters after the data show significant difference($P<0.05$). The same in the following tables.

2.1.2 果 糖 由表 2 可知,厚皮甜瓜果实中的果糖积累较缓慢,各处理均于花后 28 d 达到最高值,之后略有下降。不同处理间果实中的果糖含量在花后 7 d 差异显著;花后 14 和 28 d,处理 B 与处理 A 间无显著差异,但均与处理 C 差异显著,说明在此期间,补光需要达到一定强度才可显著影响果糖含量;花后 35 d,2 个补光处理的果糖含量均与处理 A 存在显著差异;在成熟果实(花后 42 d)中,各处理间均存在显著差异,处理 B 和 C 果实中的果糖含量较处理 A 分别增加了 15.3%和 8.2%。在果糖积累的整个过程中,光照强度越大,甜瓜果实中果糖含量

越高。
2.1.3 可溶性糖 由表 3 可知,厚皮甜瓜果实中的可溶性糖含量在果实发育的前 4 周积累速度较为缓慢,随后有所加快。在花后 7 d,处理 C 果实中可溶性糖含量与处理 A 存在显著差异;花后 14 和 21 d,各处理间差异不显著,说明该时段果实中可溶性糖的积累受光照影响较小;之后,处理 C 果实中可溶性糖含量与处理 A 一直存在显著性差异,其中在花后 42 d 各处理间均存在显著性差异。与处理 A 相比,处理 B 和 C 的成熟果实中,可溶性糖含量分别增加了 5.5%和 11.8%。总体而言,光照越强的处

理,甜瓜果实中可溶性糖含量越高。

表 2 不同光照强度处理下厚皮甜瓜果实中果糖含量随果实发育的变化

Table 2 Change of fructose content in the melon fruit in different light intensity treatments						mg/g
处 理 Treatment	花后时间/d Day after pollination					
	7	14	21	28	35	42
A	6.09 c	7.14 b	10.47 b	18.07 b	15.64 b	14.63 c
B	6.81 b	7.18 b	11.17 ab	17.57 b	16.62 a	15.83 b
C	8.08 a	8.38 a	11.81 a	19.41 a	17.04 a	16.86 a

表 3 不同光照强度处理下厚皮甜瓜果实中可溶性糖含量随果实发育的变化

Table 3 Change of soluble sugar content in the melon fruit in different light intensity treatments						mg/g
处 理 Treatment	花后时间/d Day after pollination					
	7	14	21	28	35	42
A	13.60 b	26.71 a	29.20 a	31.74 b	68.87 b	82.81 c
B	15.93 b	26.73 a	29.47 a	32.60 b	70.47 ab	87.34 b
C	19.84 a	26.67 a	29.71 a	39.60 a	73.09 a	92.55 a

2.2 光照强度对厚皮甜瓜果实中蔗糖代谢相关酶活性的影响

2.2.1 磷酸蔗糖合成酶(SPS) 由表 4 可知,在处理 A 的厚皮甜瓜果实中,SPS 活性在花后 7~14 d 和花后 35~42 d 都较低,花后 21 d 时达到最大值。在处理 B 的果实中,SPS 活性在花后 28 d 达到最大

值,之后活性略有下降。在处理 C 的果实中,SPS 活性随果实的成熟总体呈升高趋势。各个光照处理间的 SPS 活性在花后 7~35 d 差异均不显著,在果实成熟(花后 42 d)时各个光照处理间差异显著。从花后 28 d 开始,光照越强的处理 SPS 活性越高。

表 4 不同光照强度处理下厚皮甜瓜果实中磷酸蔗糖合成酶活性随果实发育的变化

Table 4 Change of sucrose phosphate synthase activities in the melon fruit in different light intensity treatments						
		$\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{g})$				
处 理 Treatment	花后时间/d Day after pollination					
	7	14	21	28	35	42
A	12.67 a	11.67 a	19.40 a	15.73 a	12.22 a	11.90 b
B	10.12 a	18.66 a	16.60 a	21.09 a	19.26 a	17.17 ab
C	10.30 a	12.74 a	13.77 a	22.88 a	20.14 a	21.70 a

2.2.2 蔗糖合成酶(SS) 由表 5 可知,在处理 A 的厚皮甜瓜果实中,SS 活性在果实发育前期(花后 7~21 d)较高,花后 28~35 d 活性很低,之后活性又有所上升。2 个补光处理果实中的 SS 活性变化趋势较为一致:前期(花后 7~21 d)活性较低,后期(花

后 28~42 d)活性明显升高。在花后 14 d 内,各个光照处理间 SS 含量差异不显著,之后各个光照处理间 SS 含量差异性增大,光照越强的处理 SS 活性越高。可见,补光明显提高了厚皮甜瓜果实中 SS 的活性。

表 5 不同光照强度处理下厚皮甜瓜果实中蔗糖合成酶活性随果实发育的变化

Table 5 Change of sucrose synthase activities in the melon fruit in different light intensity treatments						
		$\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{g})$				
处 理 Treatment	花后时间/d Day after pollination					
	7	14	21	28	35	42
A	12.67 a	15.11 a	14.47 a	4.90 c	6.83 b	13.94 b
B	10.11 a	11.75 a	10.64 ab	16.18 b	16.73 ab	21.09 ab
C	10.30 a	16.00 a	8.13 b	27.67 a	29.08 a	24.67 a

2.2.3 中性转化酶(NI) 由表 6 可知,厚皮甜瓜中的 NI 活性在果实发育中前期呈下降趋势,其中在花后 28 d 活性降至检测水平之下,之后 NI 活性小幅上升,但总体活性水平较低。在花后 7~35 d,不同光照处理间的 NI 活性差异不大,总体上以光照越强的处理 NI 活性水平越高;成熟(花后 42 d)

甜瓜果实中处理 C 的 NI 活性显著高于处理 A 和 B。

2.2.4 酸性转化酶(AI) 由表 7 可知,甜瓜果实中 AI 活性在花后 28 d 前小幅波动之后开始下降。总体而言,光照越强的处理 AI 活性越高。花后 7 和 28 d 时,不同光照处理间 AI 活性差异显著,其余时

间均不显著。

表 6 不同光照强度处理下厚皮甜瓜果实中性转化酶活性随果实发育的变化

Table 6 Change of neutral invertase activities in the melon fruit in different light intensity treatments

处 理 Treatment	花后时间/d Day after pollination					
	7	14	21	28	35	42
A	4.89 a	2.89 a	0.73 a	0.00 a	0.71 a	0.32 b
B	4.72 a	3.40 a	0.73 a	0.00 a	1.06 a	0.44 b
C	5.56 a	3.55 a	0.83 a	0.00 a	0.68 a	0.73 a

表 7 不同光照强度处理下厚皮甜瓜果实酸性转化酶活性随果实发育的变化

Table 7 Change of acid invertase activities in the melon fruit in different light intensity treatments

处 理 Treatment	花后时间/d Day after pollination					
	7	14	21	28	35	42
A	3.43 c	4.87 a	3.14 a	5.16 b	2.22 a	2.14 a
B	4.53 b	7.01 a	3.50 a	5.87 ab	2.53 a	2.48 a
C	6.12 a	7.37 a	3.60 a	6.57 a	3.20 a	2.79 a

3 讨 论

糖含量是衡量甜瓜品质的主要指标之一,蔗糖积累是甜瓜果实糖分提高的重要原因^[20]。而植物组织中贮藏糖分的变化与蔗糖代谢酶的关键酶有关^[21]。本研究表明,“一品天下 108”甜瓜果实中蔗糖的积累存在明显的转折点,这是因为蔗糖相关酶活性对果实中的糖含量有重要影响^[22]。

张明方等^[23]对网纹甜瓜研究后认为,转化酶活性的下降、磷酸蔗糖合成酶和蔗糖合成酶活性的增加,是引起果实蔗糖积累的主要内在因子。本试验研究表明,在厚皮甜瓜果实发育前期(花后 7~21 d),NI 活性较高,AI 活性呈波动式变化,处理 B 和 C 果实中的 SS 和 SPS 活性较低,甜瓜果肉中果糖、可溶性糖含量较低,蔗糖积累缓慢。随着果实的逐渐发育,NI 活性在花后 28 d 时降至最低点,后有少量积累,果实中后期(28~42 d)NI 活性较果实前期(7~14 d)明显下降;AI 活性从花后 35 d 开始迅速下降;在处理 B 和 C 的果实中,SS 活性在花后 28 d 之后呈逐渐升高的趋势,且光照越强的处理果实中 SS 活性越高;SPS 活性在果实发育中期(21~28 d)达到最大值,之后小幅降低,甜瓜果实中的 SPS 活性,在果实发育中后期(28~42 d)随光照增强而升高,果肉中果糖、可溶性糖含量增加,蔗糖开始大量积累。补光处理使厚皮甜瓜果肉 AI 和 NI 活性略有升高,同时增强了 SS 和 SPS 活性,尤其是 SS 活性在花后 28~42 d 时明显高于对照处理。可见,厚皮甜瓜果肉中蔗糖的积累受 SS 活性影响较大,其蔗糖含量与 SS 活性呈正相关。

在甜瓜果实成熟期,仅从蔗糖相关代谢酶活性的有限变化,难以解释蔗糖积累随光照强度增强而提高这一现象。因为虽然此期间光照越强,SPS 和 SS 活性越高,促进了蔗糖的合成;但是光照越强的处理中,NI 和 AI 活性也越大,转化酶能分解蔗糖成为果糖。索滨华等^[24]通过¹⁴CO₂ 示踪研究发现,同化产物在发育后期的网纹甜瓜果实中的积累量较前期提高 20%。因此推测,光照强可促进果实中同化产物直接以可溶性糖(蔗糖)形式积累,从而使得光照越强的处理,果实中的蔗糖含量在发育后期越高。本试验中,处理 C 与处理 A 之间的蔗糖含量基本上一直存在显著性差异,而处理 B 与处理 A 间的差异较小。

在整个果实发育期内,厚皮甜瓜果实中果糖与可溶性糖的积累随光照增强而升高。从开花到花后 28 d,果实中果糖含量明显高于蔗糖含量,可溶性糖含量在此期间缓慢积累;之后果实中蔗糖和可溶性糖含量迅速增加,而果糖含量略有降低。说明在果实发育中后期,可溶性糖主要以蔗糖形式存在于果实中。光强与果糖积累的关系密切,补光 100 μmol/(m²·s)与补光 50 μmol/(m²·s)的处理之间,除花后 21 和 35 d 厚皮甜瓜果实中的果糖含量差异性不显著外,在其余果实发育阶段均存在显著性差异,补光 100 μmol/(m²·s)的处理与自然光照处理间一般均存在显著性差异。对于可溶性糖,补光 100 μmol/(m²·s)的处理与自然光照之间也基本存在显著性差异,而补光 50 μmol/(m²·s)的处理与自然光照间的差异总体不显著。

4 结 论

总体而言,补光程度需达到某一阈值后,对甜瓜果实糖分积累和蔗糖酶活性的变化才有较大影响。就本试验而言,冬季补光 $50\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的效果不明显,补光 $100\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 即可见到较为明显的效果。

[参考文献]

- [1] 马克奇,陈年来,王 鸣. 甜瓜优质栽培理论与实践 [M]. 北京:中国农业出版社,2001:45-52.
Ma K Q, Chen N L, Wang M. Melon cultivation theory and practice of high-quality [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001:45-52. (in Chinese)
- [2] McCollum T G, Huber D J, Cantliffe D J. Soluble sugar accumulation and activity of related enzymes during muskmelon fruit development [J]. J Amer Soc Hort Sci, 1998, 113(3): 399-403.
- [3] Teixeira R T, Knorpp C, Glimelius K. Modified sucrose, starch, and ATP levels in two alloplasmic male-sterile lines of *B. napus* [J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(414): 1245-1253.
- [4] Moriguchi T, Sanada T, Yamaki S. Seasonal fluctuation of some enzymes relating to sucrose and sorbitol metabolism in peach fruit [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1990, 115: 278-281.
- [5] Vizzotto G, Pinton R, Varanini Z, et al. Sucrose accumulation in developing peach fruit [J]. Physiologia Plantarum, 1996, 96: 225-230.
- [6] 孟海玲,王有年,李奕松,等. 桃树子房发育初期蔗糖含量及其相关酶活性的变化 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 779-785.
Meng H L, Wang Y N, Li Y S, et al. Changes of sucrose content and activities of relative enzymes in sucrose metabolism in the early developing ovaries of peach [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(3): 779-785. (in Chinese)
- [7] Hubbard N L, Huber S C, Pharr D M. Sucrose phosphate synthase and acid invertase as determinants of sucrose concentration in developing muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruits [J]. Plant Physiology, 1989, 89: 1527-1534.
- [8] Lester G E, Arias L S, Gomez-Lim M. Muskmelon fruit soluble acid invertase and sucrose phosphate synthase activity and polypeptide profiles during growth and maturation [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2001, 126: 33-36.
- [9] Souleyre E J F, Iannetta P P M, Ross H A, et al. Starch metabolism in developing strawberry (*Fragaria* × *Ananassa*) fruits [J]. Physiologia Plantarum, 2004, 121(3): 369-376.
- [10] 陈俊伟,谢 鸣,蒋桂华,等. 不同时期采收的草莓果实糖含量差异的代谢机理 [J]. 园艺学报, 2007, 34(5): 1147-1150.
Chen J W, Xie M, Jiang G H, et al. Difference in sugar content of fruit harvested in different month strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch 'Tochiotome') and its relation to sucrose metabolism [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2007, 34(5): 1147-1150. (in Chinese)
- [11] Kortstee A J, Appeldoorn N J G, Oortwijn M E P, et al. Differences in regulation of carbohydrate metabolism during early fruit development between domesticated tomato and two wild relatives [J]. Planta, 2007, 226: 929-939.
- [12] Islam M S, Matsui T, Yoshida Y. Carbohydrate content and activities of sucrose synthase, sucrose phosphate synthase and acid invertase in different tomato cultivars during fruit development [J]. Scientia Horticulturae, 1996, 65(2/3): 125-136.
- [13] Klein R R, Crafs-Brandner S J, Salvucci M E. Cloning and development expression of the sucrose phosphate synthase gene from spinach [J]. Planta, 1993, 190: 498-510.
- [14] Hubbard N L, Huber S C, Pharr D M. Sucrose phosphate synthase and acid invertase as determinants of sucrose concentration in developing muskmelon fruits [J]. Plant Physiology, 1989, 91: 1527-1534.
- [15] 廖曼珉,曹皓生,薛林宝,等. 摘除雌花对甜瓜成熟叶片中糖及相关酶活性的影响 [J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(2): 131-133.
Miu M M, Cao B S, Xue L B, et al. Effect of pistillate flower removing on sugar content and relative enzyme activities in mature leaves of *Cucumis melo* [J]. Plant Physiology Communications, 2003, 39(2): 131-133. (in Chinese)
- [16] 张明方,蒋有条,余 杭,等. 甜瓜不同变种果实发育过程中的糖分转化与酶活性变化 [J]. 浙江农业学报, 1998, 10(6): 310-312.
Zhang M F, Jiang Y T, Yu H, et al. Comparison of sugar contents and its related metabolic enzyme activities in developing fruits of *Cucumis melo* [J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 1998, 10(6): 310-312. (in Chinese)
- [17] Murchie E H, Sarrobert C, Contard P, et al. Overexpression of sucrose-phosphate synthase in tomato plants grown with CO_2 enrichment leads to decreased foliar carbohydrate accumulation relative to untransformed controls [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 1999, 37(4): 251-260.
- [18] 於新建,张振清. 现代植物生理学实验指南 [M]. 北京:科学出版社, 1999: 127-128.
Yu X J, Zhang Z Q. Experimental guide of modern plant physiology [M]. Beijing: Science Press, 1999: 127-128. (in Chinese)
- [19] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 103-107.
Gao J F. Experimental instruction of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 103-107. (in Chinese)
- [20] Lowell C A, Tomlinson P T, Koch K E. Sucrose-metabolizing enzymes in transport tissue and adjacent sink structures in developing citrus fruit [J]. Plant Physiology, 1989, 90: 1394-1402.
- [21] Sarah E L, Dunlap J R. Sucrose metabolism in netted muskmelon fruit during development [J]. Plant Physiology, 1987, 84: 386-389.

[22] 乔永旭. 果实发育过程中糖积累与蔗糖代谢相关酶的关系 [J]. 果树学报, 2004(5): 43-49.
Qiao Y X. Study on the correlation of sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzymes during the developing period of muskmelon [J]. Journal of Fruit Science, 2004(5): 43-49. (in Chinese)

[23] 张明方, 李志凌. 网纹甜瓜发育果实糖分积累与蔗糖代谢参与酶的关系 [J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(5): 455-462.
Zhang M F, Li Z L. The relationship between sugar accumulation and enzymes related to sucrose metabolism in developing fruits of muskmelon [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2003, 29(5): 455-462. (in Chinese)

[24] 索滨华, 陈 光, 王德辉, 等. 网纹甜瓜糖的积累 [J]. 核农学报, 1997, 11(3): 190-192.
Suo B H, Chen G, Wang D H, et al. The accumulation of netted melon [J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1997, 11(3): 190-192. (in Chinese)

(上接第 119 页)

[13] 严志强, 颜章雄, 胡宝清, 等. 虚拟土地虚拟土地战略与区域土地资源优化配置管理的理论探讨 [J]. 广西社会科学, 2007(10): 70-74.
Yan Z Q, Yan Z X, Hu B Q, et al. Discussing the theory of the Virtual land and virtual land strategy with regional optimal allocation of land resources management [J]. Guangxi Social Science, 2007(10): 70-74. (in Chinese)

[14] 闫丽珍, 成升魁, 闵庆文. 玉米南运的虚拟耕地资源流动及其影响分析 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(3): 342-348.
Yan L Z, Cheng S K, Min Q W. Virtual farmland flow and effects of maize sent from the North to the South [J]. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2006, 23(3): 342-348. (in Chinese)

[15] 刘红梅, 王克强, 石 芳. 中国粮食虚拟土地资源进口的实证分析 [J]. 中国农村经济, 2007(11): 26-51.
Liu H M, Wang K Q, Shi F. Analysis on the imports of the virtual land resources in China's grain [J]. Chinese Rural Economy, 2007(11): 26-51. (in Chinese)

[16] 成 丽, 方天塑, 潘春玲. 中国粮食贸易中虚拟耕地贸易的估算 [J]. 中国农村经济, 2008(6): 25-31.
Cheng L, Fang T S, Pan C L. Estimating the quantity of virtual cultivated land in China's grain trade [J]. Chinese Rural Economy, 2008(6): 25-31. (in Chinese)

[17] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009. (in Chinese)

[18] 中华人民共和国国家统计局. 中国农村统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
National Bureau of Statistics of China. China rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009. (in Chinese)

[19] 中华人民共和国农业部. 中国农业发展报告 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997-2009.
Ministry of Agricultural of China. China Agricultural development report [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997-2009. (in Chinese)

[20] 龙爱华, 徐中民, 张志强. 虚拟水理论方法与西北 4 省(区)虚拟水实证研究 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 577-584.
Long A H, Xu Z M, Zhang Z Q. Estimate and analysis of water footprint in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 19(4): 577-584. (in Chinese)