

‘临稻16’和‘临稻10’光合速率以及蔗糖、淀粉积累的比较研究

冯尚宗^{1,#,*}, 李重阳^{2,#}, 王新娟³, 王世伟¹, 娄华敏⁴, 周伟⁴, 刘宁⁵, 杨兴洪^{2,*}

¹临沂市农业技术推广服务中心, 山东临沂276003;

²山东农业大学生命科学学院, 山东泰安271018;

³临沂市农业科学院, 山东临沂276000;

⁴临沂市种子管理站, 山东临沂276003;

⁵山东中农天泰种业有限公司, 山东平邑273300

摘要: 本文以‘临稻16’和‘临稻10’作为实验材料, 探讨‘临稻16’相对于‘临稻10’产量高的生理基础。研究结果表明: ‘临稻16’在开花前以及灌浆中期的剑叶净光合速率较‘临稻10’高, 为‘临稻16’后期籽粒灌浆和淀粉积累提供了物质基础。蔗糖合成和淀粉代谢的关键酶活性测定结果表明, ‘临稻16’在开花前、灌浆中期以及灌浆期剑叶蔗糖合成酶(SS)和蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性均显著高于‘临稻10’, 籽粒中腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(AGPase)活性在‘临稻16’中也表现出较高的活性, ‘临稻16’籽粒中淀粉的含量在灌浆后期显著高于‘临稻10’。灌浆后期‘临稻16’仍然保持较高的蔗糖和淀粉代谢相关酶活性, 淀粉合成速率较快, 有利于‘临稻16’籽粒中淀粉的积累。而‘临稻10’淀粉合成速率明显减缓。这说明决定‘临稻16’产量和出米率的主要因素集中在灌浆中期, 为‘临稻16’高产奠定基础。

关键词: 临稻; 光合速率; 蔗糖代谢; 淀粉积累

水稻是重要的粮食作物, 在粮食安全中占有重要的地位, 水稻的产量和质量与粮食安全密切相关。光合作用不仅是水稻生长发育的基础, 也是产量的决定因素。组成植物产量的干物质有90%~95%来源于光合作用, 通过提高植物光合碳同化能力, 增加其光合有效辐射的积累量, 能够有效增加植物成熟期的生物量。

水稻产量的高低除了取决于籽粒灌浆过程中光合源特别是剑叶有较强的光合物质生产能力, 还要求叶片中的光合产物较多地分配到籽粒中去, 从而提高粒重和产量(Tuncel和Okita 2013; Zhang等2001)。光合产物的生产、运输和分配生理过程较为复杂, 其过程可大体归纳为: 作物绿色部分源端(主要是成熟叶片)生产积累光合产物, 通过韧皮部运输(流), 同化物最终在库端被卸出, 作物产量受源、流、库的平衡调节。

作物籽粒产量在很大程度上决定于生育后期的光合同化能力, 其花后光合同化物对籽粒的贡献率为73.5%~81.2%。而水稻的剑叶是水稻生长后期光合效率最高的叶片, 它对籽粒的形成和产量贡献很大, 它还是水稻籽粒碳水化合物的主要来源。水稻属于糖叶植物, 开花期至成熟期水稻

叶片中产生的光合产物主要是以蔗糖的形式存在和运输(Reynolds等2012), 光合作用产生的蔗糖被运输到籽粒, 并在籽粒中被降解为合成淀粉的原料, 这一过程与叶片的光合作用和籽粒的淀粉累积密切相关。籽粒中的淀粉占籽粒总干重的70%左右, 因此淀粉的合成与积累也与产量密切相关(王伟青2007)。淀粉是植物中重要的储存多糖, 其含量和品质直接影响着作物的产量和经济价值。水稻开花后, 由叶片合成的蔗糖, 通过韧皮部运输到籽粒中, 并在籽粒中降解为合成淀粉的原料。一般认为, 控制叶片中蔗糖合成的酶是蔗糖磷酸合成酶(sucrose phosphate synthase, SPS), 而库细胞中蔗糖的降解主要由蔗糖合成酶(sucrose synthase, SS)催化, 二者协作共同调节蔗糖合成与降解的平衡。

水稻‘临稻16’是山东省沂南县水稻研究所以‘临稻11’为母本、‘淮稻6’为父本有性杂交, 采用系谱法选育而成的中晚熟常规粳稻品种。该品种具

收稿 2018-12-10 修定 2019-02-25

资助 山东省现代农业产业技术体系水稻创新团队项目资金(SDAIT-17-12)。

并列第一作者。

* 共同通讯作者: 冯尚宗(taoluef@163.com)、杨兴洪(xhyang@sdau.edu.cn)

有产量高、米质优、抗病性较好、熟期适中、适应性强等特点,汇集了‘临稻11’和‘淮稻6’的优点,实现了多抗、优质、高产的统一。水稻产量的高低与源、库、流三者之间的协调作用密切相关,本研究以‘临稻10’作为对照,从源库代谢的水平探究‘临稻16’高产的生理基础,为今后的水稻育种提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料及培养条件

在山东省临沂市河东区合胜水稻种植专业合作社试验地,取水稻(*Oryza sativa* L.)品种‘临稻16’和‘临稻10’,播种量 $50\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,5月23日早育秧,施肥 $75\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。7月9日人工插秧,行距26 cm,墩距14 cm,3~5苗·墩⁻¹。10月25日收获。大田底肥施用复合肥(17-17-17) $50\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,7月15日追施分蘖肥尿素 $10\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,7月25日追施穗肥尿素 $10\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ +氯化钾 $10\text{ kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$,浇水3次。防病3次:8月1日,喷施75%三环唑 $25\text{ g}+30\%$ 苯丙甲环唑 $20\text{ mL}+$ 苏云金杆菌 $100\text{ g}\cdot 667\text{ m}^{-2}$;8月17日,喷施40%稻瘟灵乳油 $80\text{ mL}+430\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 戊唑醇悬浮剂 $10\text{ mL}+10\%$ 氯苯虫酰胺悬浮剂 $20\text{ mL}\cdot 667\text{ m}^{-2}$;9月5日,喷施稻清 $60\text{ mL}+70\%$ 甲基托布津可湿性粉剂 $100\text{ g}+25\%$ 吡蚜酮可湿性粉剂 $20\text{ g}\cdot 667\text{ m}^{-2}$ 。

数据为2016年和2017年2年重复,以2017年数据为主。光合参数、酶活性、蔗糖和淀粉含量的测定分为3次:开花前(8月22日)、灌浆中期(9月15日)和灌浆后期(9月29日)。

1.2 光合参数的测定

水稻剑叶光合参数净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)采用CIRAS-3便携式光合系统(PPSystems, 英国)测定,测定时饱和光强为 $1\ 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 浓度为 $380\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$,叶室温度控制在 25°C ,相对湿度70%。每次测定时间在晴天上午9:00~10:00,每个品种测定6株重复。

1.3 剑叶蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶活性以及蔗糖含量的测定

蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(ADP-glucose pyrophosphory-

lase, AGPase)等酶活性的测定:每株取剑叶 0.1 g 材料放入液氮速冻,之后转入 -80°C 冰箱保存,待测。每个品种取6个重复,每个重复取自不同植株。酶活性测定采用苏州科铭生物技术有限公司试剂盒(蔗糖合成酶试剂盒编号:SSII-2-Y;蔗糖磷酸合成酶试剂盒编号:SPS-2-Y;蔗糖含量试剂盒编号:ZHT-2-Y)。

1.4 籽粒蔗糖合成酶、腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶活性以及蔗糖和淀粉含量的测定

蔗糖和淀粉含量的测定:每株取籽粒连同水稻颖壳取材 0.5 g 材料放入液氮速冻,之后转入 -80°C 冰箱保存,待测,每个品种取6个重复,每个重复取自不同植株,测定采用苏州科铭生物技术有限公司的试剂盒测定(蔗糖合成酶试剂盒编号:SSII-2-Y;腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶试剂盒编号:AGP-2A-Y;蔗糖含量试剂盒编号:ZHT-2-Y;淀粉含量试剂盒编号:DF-2-Y)。

1.5 水稻植株性状和产量性状的统计

在水稻成熟收获前,采用五点取样法,对稻田进行分区取样,取样之后分别统计水稻的株高、穗长、籽粒干重、茎秆叶干重、总干重、穗粒数、单穗粒重、干粒重、穗实粒数以及结实率,计算得出 667 m^2 穗数。经济系数=经济产量/生物产量 $\times 100\%$ 。

1.6 数据处理

采用Excel 2016进行数据统计,采用SigmaPlot 12.0软件作图,SAS软件对数据进行差异性分析。

2 实验结果

2.1 ‘临稻16’和‘临稻10’光合参数的比较

从图1来看,‘临稻16’在开花前净光合速率(P_n)较‘临稻10’显著增高,到灌浆中期,‘临稻16’光合还是明显高于‘临稻10’,在开花前到灌浆后期‘临稻10’光合速率没有明显变化,而‘临稻16’则出现了下降。气孔作为水分和 CO_2 进出的通道,对光合作用起到调节作用,从气孔导度(G_s)数据看出,光合速率的变化与 G_s 的变化呈现正相关的趋势。而胞间二氧化碳浓度(C_i)与光合呈现负相关的趋势。蒸腾速率(T_r)呈现出与光合速率以及气孔导度相一致的趋势。光合参数数据表明‘临稻16’具有较高的净光合速率,有利于同化物合成和积累。

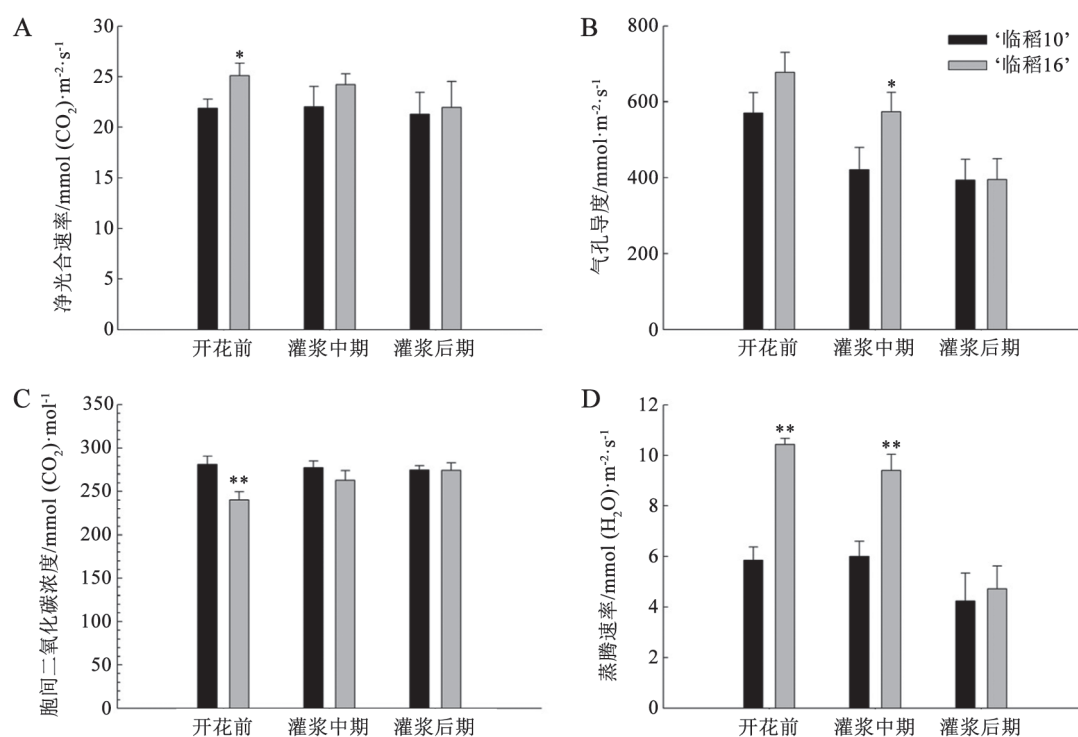


图1 ‘临稻16’和‘临稻10’的光合参数变化

Fig.1 Changes in photosynthetic parameters of ‘Lindao 16’ and ‘Lindao 10’

*和**分别表示同一时期不同品种之间在0.05和0.01水平上差异显著。下图同此。

2.2 ‘临稻16’和‘临稻10’剑叶SS、SPS活性以及蔗糖含量的变化

蔗糖磷酸合成酶(SPS)是植物体内蔗糖合成途径中的一个重要控制点,其活性的高低代表了剑叶光合产物转化为蔗糖的能力。从图2-A可以看出,‘临稻10’和‘临稻16’的SPS活性呈现先上升后下降的趋势,各个时期的‘临稻16’SPS活性都极显著高于‘临稻10’。SS具有合成蔗糖和降解蔗糖的双向活性作用,在光合器官中SS具有催化蔗糖合成的能力,由图2-B中可以看出,SS和SPS活性呈现出相同的趋势。表明‘临稻16’具有较高的蔗糖供给能力以及较高的蔗糖合成能力。‘临稻16’剑叶积累蔗糖的过程是逐渐升高,而‘临稻10’出现了先上升后下降的趋势(图2-C),后期‘临稻10’剑叶不能供给籽粒更多蔗糖。

2.3 ‘临稻16’和‘临稻10’籽粒SS、AGPase活性以及蔗糖和淀粉含量变化

蔗糖合成酶(SS)在籽粒中主要是催化蔗糖的

降解,为合成淀粉提供原料。从图3可以看出‘临稻16’的籽粒中开花前、灌浆中期以及灌浆后期都表现出较高的SS活性,而‘临稻16’籽粒中蔗糖含量是随着灌浆时间的延长逐渐减少,并且在灌浆后期‘临稻16’蔗糖下降速率明显大于‘临稻10’。说明‘临稻16’具有较高的蔗糖降解能力,能够快速降解从剑叶运输到籽粒的蔗糖,从而积累更多的淀粉。

ADPG焦磷酸化酶(AGPase)在淀粉合成中催化淀粉合成的第一个步骤,是淀粉合成的关键酶,其活性大小与淀粉积累速率和灌浆速率呈现正相关。图4-A可以看出‘临稻16’的AGPase活性在各个时期都是显著高于‘临稻10’,表明‘临稻16’具有较高的ADPG供给能力。

淀粉是水稻籽粒的重要组成,占粒重的70%左右,水稻灌浆是淀粉的充实过程,主要是淀粉的合成和积累过程,故淀粉积累的多少直接关系到水稻产量的高低。图4-B可以看出,随着灌浆时间的延长,‘临稻16’的淀粉积累逐渐增多,而在灌浆

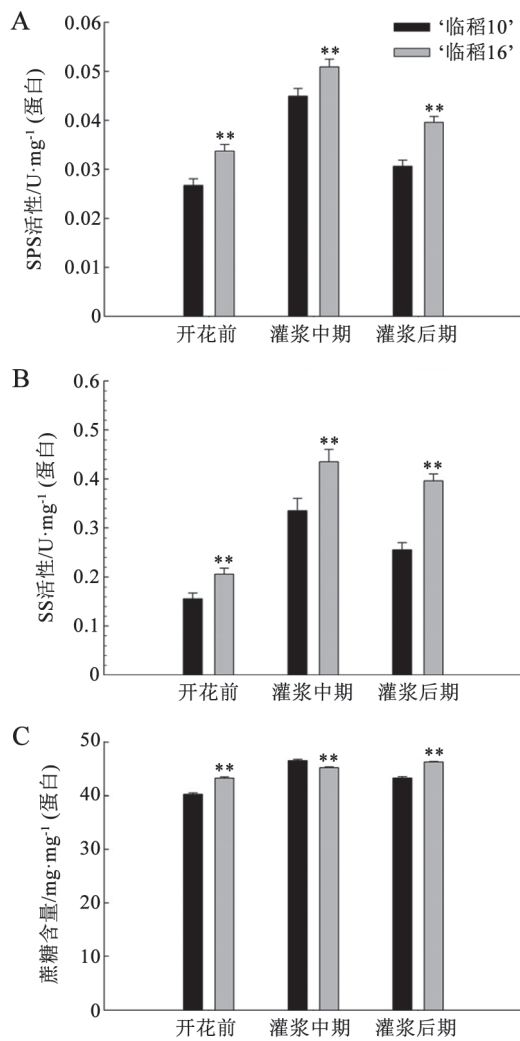


图2 ‘临稻16’和‘临稻10’剑叶SS和SPS活性以及蔗糖含量的变化

Fig.2 Changes of SS and SPS activities and sucrose contents in flag leaves of ‘Lindao 16’ and ‘Lindao 10’

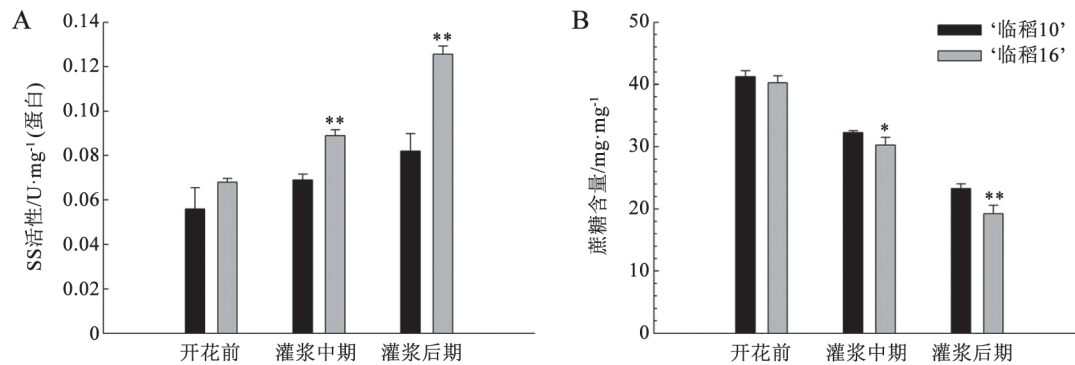


图3 ‘临稻10’和‘临稻16’籽粒中SS活性和蔗糖含量的变化

Fig.3 Changes of SS activities and sucrose contents in seeds of ‘Lindao 10’ and ‘Lindao 16’

后期‘临稻10’的淀粉合成情况出现了明显的减慢趋势,表明‘临稻16’具有较高的籽粒淀粉合成能力。

2.4 ‘临稻16’和‘临稻10’产量统计

我们进一步对水稻植株性状以及产量进行了统计,发现‘临稻16’茎秆干重、总干重都较‘临稻10’有显著性提高(表1);且‘临稻16’的单穗粒重、千粒重、产量以及经济系数都极显著高于‘临稻10’(表2),但‘临稻16’的每667 m²穗数显著低于‘临稻10’,可能由于‘临稻16’穗粒数明显高于‘临稻10’,尽管每667 m²穗数小于‘临稻10’,但产量高于‘临稻10’,增加了单株的库容量,这也是‘临稻16’保持高产的原因之一。

3 讨论

3.1 水稻剑叶净光合速率与水稻产量的关系

源足是获得高产的基础,具有充足的源才能够进一步扩大库容,使源库相对协调(姜元华等2015;付景2012)。叶片是水稻进行光合作用的主要器官,提高光合生产力主要有2种途径:一是增加绿色叶面积或延长功能叶的光合时间,二是增加单个叶片的光合生产能力(李旭毅2011)。叶面积指数和叶片功能期的长短以及叶片的光合能力等都是衡量源强的重要指标。‘临稻16’光合速率在前期明显高于‘临稻10’,能够积累足够多的光合产物;而‘临稻10’在后期光合速率高于‘临稻16’,这可能由于在灌浆后期‘临稻10’的SS和SPS活性明显低于‘临稻16’,导致‘临稻10’光合产生的蔗糖不能被及时高效地利用有关,这也是‘临稻16’产量较高的原因之一。

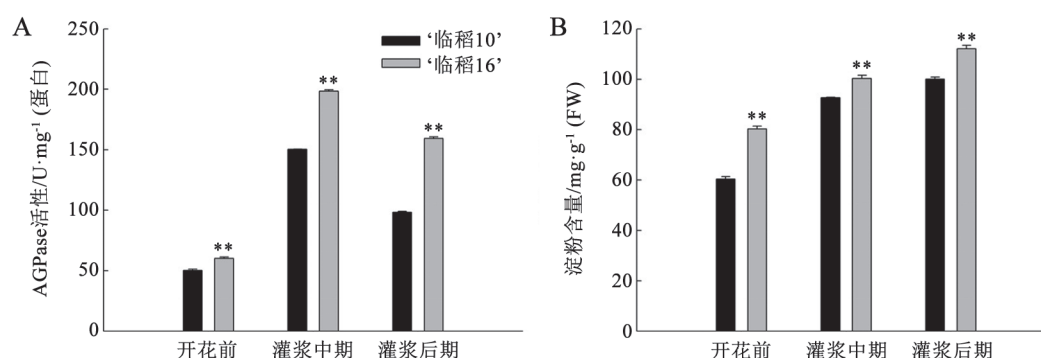


图4 ‘临稻10’和‘临稻16’籽粒中AGPase活性和淀粉含量的变化

Fig.4 Changes of AGPase activities and starch content in seeds of ‘Lindao 10’ and ‘Lindao 16’

表1 ‘临稻16’和‘临稻10’植株性状及结实率统计

Table 1 Statistics on traits and seed setting rate of ‘Lindao 16’ and ‘Lindao 10’

品种	株高/cm	穗长/cm	籽粒干重/g·穗 ⁻¹	茎秆叶干重/g·穗 ⁻¹	总干重/g·穗 ⁻¹	穗总粒数	穗实粒数	结实率/%
‘临稻16’	89.36±5.67	16.45±0.67	3.47±0.49	2.42±0.32**	5.89±0.78*	112.78±18.84	105.99±16.65	94.09±1.85**
‘临稻10’	86.84±1.19	15.31±0.45	2.50±0.20	2.14±0.17	4.64±0.34	104.36±9.14	89.89±6.82	86.22±2.37

*和**分别表示在不同品种之间在0.05和0.01水平上差异显著, 下表同此。

表2 ‘临稻16’和‘临稻10’产量相关性状统计

Table 2 Statistics on yield-related traits of ‘Lindao 16’ and ‘Lindao 10’

品种	单穗粒重/g·穗 ⁻¹	千粒重/g	穗数/万穗·667 m ²	产量/kg·667 m ²	经济系数
‘临稻16’	3.36±0.47**	31.32±0.86**	20.97±1.48**	696.12±52.82**	0.59±0.02**
‘临稻10’	2.21±0.25	24.59±1.60	25.41±0.70	561.66±50.73	0.54±0.02

3.2 水稻开花灌浆期蔗糖代谢、淀粉积累与产量的关系

水稻和小麦都属于糖叶植物, 光合产物在叶片中主要以蔗糖的形式存在(Lemoine 2000; Reynold等2012)。开花至成熟期叶片中通过光合作用所合成的产物主要是以蔗糖的形式通过韧皮部被运输到籽粒中, 并在籽粒中降解成为淀粉合成的原料。因此, 此阶段中源器官同化物的供应能力可以通过旗叶中蔗糖的合成能力来反映, 而此阶段库强度的高低可以通过籽粒中蔗糖的降解来反映(Pan等2002)。

根据蔗糖的合成代谢途径可知, SPS是蔗糖合成的主要调节酶(Champigny 1995; Huber和Huber 1996; Wang等2013; Winter和Huber 2000; Worrell等1991), 其酶活性可代表蔗糖合成速率的高低, 也是

代表源强的一个指标(Okita 1992)。库强指库器官(穗)接纳及转化同化物的能力。库细胞中蔗糖的降解主要由蔗糖合成酶(SS)催化, 有些学者甚至把库器官中SS的活性作为库强度的标志(Baroja-Fernández等2009; Delmer和Haigler 2002; Thévenot等2005)。本实验中‘临稻16’在剑叶SPS、剑叶SS、籽粒SS、籽粒AGPase以及剑叶蔗糖含量、籽粒蔗糖含量和籽粒淀粉含量的方面存在明显的差异(图2~4)。灌浆期‘临稻16’剑叶中较高的SPS活性使得其积累更多的蔗糖, 充分保证了‘临稻16’蔗糖快速向外转运。

随着叶片中合成的蔗糖通过韧皮部运输到籽粒中, 籽粒中的SS酶活性逐渐升高, 进而把籽粒蔗糖降解为淀粉合成的原料, 籽粒蔗糖含量呈现逐渐降低的趋势(图3)。籽粒中蔗糖被SS降解后的产

物经过反应后生成6-磷酸葡萄糖(G6P)或1-磷酸葡萄糖(G1P), 进入造粉体后经AGPase的催化与ATP反应生成淀粉合成的前体物腺苷二磷酸葡萄糖(ADPG), 进而合成淀粉(Ballicora等2004)。在水稻、小麦、玉米、马铃薯和其它作物中, 在灌浆期由于AGPase的活性和淀粉积累速率正相关, 因而AGPase酶被看作是淀粉合成的一个主要限速酶(Jiang等2002; Tuncel和Okita 2013)。许多的研究已经表明通过增强AGPase酶的活性可以提高作物的淀粉合成能力进而提高作物产量(Li等2011; Sakulsingharoj等2004; Smidansky等2002, 2003, 2007)。在本研究中, AGPase活性随灌浆的进行活性逐渐升高, 随AGPase活性的升高, 籽粒淀粉含量逐渐增加。由于‘临稻16’品系具有较高的AGPase活性和 P_n , 因而在整个灌浆时期其籽粒淀粉含量始终高于‘临稻10’。

在成熟期淀粉含量占籽粒干重的70%左右, 表2的数据可以看出‘临稻16’的产量达 $696.12 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$, 比‘临稻10’高23.94%。两品系千粒重和穗粒重方面存在显著差异, 这些差异有利于‘临稻16’最终产量的提高。‘临稻16’所具有的高剑叶SPS活性、籽粒SS活性和AGPase活性确保了‘临稻16’产生的光合产物能及时有效地从叶片运输到籽粒中, 并在籽粒中及时转化为淀粉。

研究表明, 拥有较大的库容是水稻获得高产的关键因素之一(刘民2016; 潘俊峰等2015; Nakamura等1989)。穗数和每穗粒数是构成产量的基础因素, 也是水稻获得高产的重点调控目标。‘临稻16’具有较多的穗粒数且结实率较‘临稻10’高(表2), 说明‘临稻16’有较强的库强, 加之‘临稻16’较高的净光合速率(源强), 这为‘临稻16’的高产性状奠定了基础。

参考文献(References)

- Ballicora MA, Iglesias AA, Preiss J (2004). ADP-glucose pyrophosphorylase: a regulatory enzyme for plant starch synthesis. *Photosynth Res*, 79: 1–24
- Baroja-Fernández E, Muñoz FJ, Montero M, et al (2009). Enhancing sucrose synthase activity in transgenic potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers results in increased levels of starch, ADPglucose and UDPglucose and total yield. *Plant Cell Physiol*, 50: 1651–1662
- Champigny ML (1995). Integration of photosynthetic carbon and nitrogen metabolism in higher plants. *Photosynth Res*, 46: 117–127
- Delmer DP, Haigler CH (2002). The regulation of metabolic flux to cellulose, a major sink for carbon in plants. *Metab Eng*, 4: 22–28
- Fu J (2012). Yield formation physiology and cultivation regulation in super rice (dissertation). Yangzhou: Yangzhou University (in Chinese with English abstract) [付景 (2012). 超级稻产量形成生理与栽培调控的研究(学位论文): 扬州: 扬州大学]
- Huber SC, Huber JL (1996). Role and regulation of sucrose-phosphate synthase in higher plants. *Annu Rev Plant Biol*, 47: 431–444
- Jiang D, Yu ZW, Li YG, et al (2002). Effects of different nitrogen application levels on changes of sucrose content in leaf, culm, grain and photosynthate distribution and grain starch accumulation of winter wheat. *Sci Agric Sin*, 35: 157–162
- Jiang YH, XU K, Zhao K, et al (2015). Canopy structure and photosynthetic characteristics of Yongyou series of Indica-Japonica hybrid rice under high-yielding cultivation condition. *Acta Agron Sin*, 41 (2): 286–296 (in Chinese with English abstract) [姜元华, 许轲, 赵可等(2015). 甬优系列籼粳杂交稻的冠层结构与光合特性. *作物学报*, 41 (2): 286–296]
- Lemoine R (2000). Sucrose transporters in plants: update on function and structure. *Biochim Biophys Acta (BBA)-Biomem*, 1465: 246–262
- Li N, Zhang S, Zhao Y, et al (2011). Over-expression of AGPase genes enhances seed weight and starch content in transgenic maize. *Planta*, 233: 241–250
- Li Y (2011). Effects of nitrogen regulation and cultivation models on sink-source construction, photosynthetic production and grain yield in rice at two kinds of ecological conditions (dissertation). Ya'an: Sichuan Agricultural University (in Chinese with English abstract) [李旭毅 (2011). 两种生态条件下氮肥调控和栽培方式对水稻库源构建和光合生产及产量的影响(学位论文): 雅安: 四川农业大学]
- Liu M (2016). research of grain filling character and source-sink relation on two panicle types of rice. *North Rice*, 46 (3): 6–9 (in Chinese with English abstract) [刘民(2016). 两种穗型水稻源库关系及籽粒灌浆特性的研究. *北方水稻*, 46 (3): 6–9]
- Nakamura Y, Yuki K, Park SY, et al (1989). Carbohydrate metabolism in the developing endosperm of rice grains. *Plant Cell Physiol*, 30 (6): 833–839
- Okita TW (1992). Is there an alternative pathway for starch

- synthesis? *Plant Physiol*, 100 (2): 560–564
- Pan JF, Cui KH, Xiang J, et al (2015) Characteristics of non-structural carbohydrate accumulation and translocation in rice genotypes with various sink-capacity. *J Huazhong Agric Univ*, 34 (1): 9–15 (in Chinese with English abstract) [潘俊峰, 崔克辉, 向镜等(2015). 不同库容量类型基因型水稻茎鞘非结构性碳水化合物积累转运特征. *华中农业大学学报*, 34 (1): 9–15]
- Pan Q, Zhen YU, Wang Y, et al (2002). Effects of nitrogen applying stage on both sucrose synthesis in flag leaves and cleavage in grains of wheat. *Sci Agric Sin*, 35 (7): 771–776
- Reynolds M, Foulkes J, Furbank R, et al (2012). Achieving yield gains in wheat. *Plant Cell Environ*, 35 (10): 1799–1823
- Sakulsingharoj C, Choi S, Hwang S, et al (2004). Engineering starch biosynthesis for increasing rice seed weight: the role of the cytoplasmic adp-glucose pyrophosphorylase. *Plant Sci*, 167 (6): 1323–1333
- Smidansky ED, Clancy M, Meyer FD, et al (2002). Enhanced ADP-glucose pyrophosphorylase activity in wheat endosperm increases seed yield. *Proc Natl Acad Sci USA*, 99 (3): 1724–1729
- Smidansky ED, Martin JM, Hannah CL, et al (2003). Seed yield and plant biomass increases in rice are conferred by deregulation of endosperm adp-glucose pyrophosphorylase. *Planta*, 216 (4): 656–664
- Smidansky ED, Meyer FD, Blakeslee B, et al (2007). Expression of a modified adp-glucose pyrophosphorylase large subunit in wheat seeds stimulates photosynthesis and carbon metabolism. *Planta*, 225 (4): 965–976
- Thévenot C, Simondcôte E, Reyss A, et al (2005). QTLs for enzyme activities and soluble carbohydrates involved in starch accumulation during grain filling in maize. *J Exp Bot*, 56 (413): 945–958
- Tuncel A, Okita TW (2013). Improving starch yield in cereals by over-expression of adp-glucose pyrophosphorylase: expectations and unanticipated outcomes. *Plant Sci*, 211 (3): 52–60
- Wang WQ (2007). The associations of photosynthesis and grain filling during grain filling period in flag leaves of wheat species (dissertation). Qingdao: Ocean University of China (in Chinese with English abstract) [王伟青 (2007). 小麦旗叶灌浆过程中光合作用及其籽粒灌浆之间的关系研究(学位论文). 青岛: 中国海洋大学]
- Winter H, Huber SC (2000). Regulation of sucrose metabolism in higher plants: localization and regulation of activity of key enzymes. *Crit Rev Biochem Mol Biol*, 35 (4): 253–289
- Worrell AC, Bruneau JM, Summerfelt K, et al (1991). Expression of a maize sucrose phosphate synthase in tomato alters leaf carbohydrate partitioning. *Plant Cell*, 3 (10): 1121–1130
- Zhang Y, Zhang Y, Wang Z, et al (2011). Characteristics of canopy structure and contributions of non-leaf organs to yield in winter wheat under different irrigated conditions. *Field Crop Res*, 123 (3): 187–195

Study on photosynthetic rate and accumulation of sucrose and starch in ‘Lindao 16’ and ‘Lindao 10’

FENG Shang-Zong^{1,#,*}, LI Chong-Yang^{2,#}, WANG Xin-Juan³, WANG Shi-Wei¹, LOU Hua-Min⁴, ZHOU Wei⁴, LIU Ning⁵, YANG Xing-Hong^{2,*}

¹Linyi Agricultural Technology Extension Service Center, Linyi, Shandong 276003, China;

²College of Life Sciences, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China

³Linyi Academy of Agricultural Sciences, Linyi, Shandong 276000, China

⁴Linyi Seed Management Station, Linyi, Shandong 276003, China

⁵Shandong Zhongnong Tiantai Seed Industry Co., Ltd., Pingyi, Shandong 273300, China

Abstract: In this paper, rice ‘Lindao 16’ and ‘Lindao 10’ were used as experimental materials to explore the physiological mechanism of the yield of ‘Lindao 16’ relative to ‘Lindao 10’. The results showed that the net photosynthetic rate in the leaves of ‘Lindao 16’ before anthesis and middle grain-filling was higher than that of ‘Lindao 10’, which created favorable conditions for starch accumulation in the early stage of ‘Lindao 16’. The results of key enzyme activities of sucrose synthesis and starch metabolism showed that the activities of sucrose synthase (SS) and sucrose phosphate synthase (SPS) in the leaves of ‘Lindao 16’ were significantly higher than those of ‘Lindao 10’ before anthesis, middle and late grain-filling stage. The adenosine diphosphate glucose pyrophosphorylase (AGPase) in grains also showed higher activity in ‘Lindao 16’. The content of starch in ‘Lindao 16’ was significantly higher than that in ‘Lindao 10’ at the late filling stage. In the late filling stage, ‘Lindao 16’ still maintained high sucrose and starch metabolism-related enzyme activities, and the starch synthesis rate was faster, while the starch synthesis rate of ‘Lindao 10’ was significantly slowed, which was beneficial to the accumulation of starch in the seeds of ‘Lindao 16’. The main factors of yield and rice yield are concentrated after flowering, laying the foundation for high yield of ‘Lindao 16’.

Key words: rice; photosynthetic rate; sucrose metabolism; starch accumulation

Received 2018-12-10 Accepted 2019-02-25

This work was supported by Rice Innovation Team Project Fund of Shandong Modern Agriculture Industrial Technology System (SDAIT-17-12).

#Co-first authors.

*Co-corresponding authors: Feng SZ (taoluef@163.com); Yang XH (xhyang@sdau.edu.cn).