

不同覆盖栽培糜子籽粒灌浆期淀粉酶活性变化

张艳平¹ 苏旺¹ 高小丽^{1*} 雷锦银² 高金锋¹ 王鹏科¹ 冯佰利¹

(1. 西北农林科技大学 农学院/旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西省横山县农业技术推广中心站, 陕西 榆林 719100)

摘要 为研究糜子开花后籽粒灌浆期间淀粉合成相关酶活性的变化及淀粉积累特征,并分析两者之间的关系;探寻糜子在干旱地区的最佳覆盖栽培模式。以梗性糜子品种榆糜2号为材料,采用秸秆覆盖、起垄覆膜、双沟覆膜和全膜覆盖处理,并以露地栽培为对照,测定籽粒灌浆期间淀粉合成相关酶活性的变化及淀粉积累动态。结果表明,覆盖栽培糜子籽粒灌浆前、中期 ADP-葡萄糖焦磷酸化酶(AGPP)、水溶性淀粉合成酶(SSS)、颗粒结合性淀粉合成酶(GBSS)及淀粉分支酶(Q酶)活性均显著高于露地栽培($P<0.05$),且籽粒淀粉积累速率较快,最终淀粉含量高于露地栽培,其中全膜覆盖效果最佳,其籽粒中支链淀粉积累量的增加率达 16.62%($P<0.05$),直链淀粉增加率 9.08%,千粒质量增加率 6.16%($P<0.05$)。但覆盖栽培没有改变 AGPP、SSS、GBSS 和 Q 酶活性的变化趋势(单峰曲线),没有影响酶活性峰值出现时间,AGPP 和 GBSS 峰值出现在花后 20 d 左右,SSS 和 Q 酶峰值出现在花后 15 d 左右。相关分析表明,糜子籽粒支链淀粉与 SSS 和 Q 酶活性呈极显著正相关,与 AGPP 酶活性呈显著正相关;直链淀粉与 GBSS 和 AGPP 酶活性呈显著或极显著正相关;总淀粉积累速率与 AGPP、GBSS、SSS 和 Q 酶活性呈显著或极显著正相关。

关键词 糜子; 覆盖栽培; 灌浆期; 淀粉酶; 支链淀粉; 直链淀粉

中图分类号 S 516

文章编号 1007-4333(2014)01-0051-08

文献标志码 A

Dynamic changes of starch synthesis enzymes activities of *Panicum miliaceum* L. grain during the filling stage under different mulching cultivation

ZHANG Yan-ping¹, SU Wang¹, GAO Xiao-li^{1*}, LEI Jin-yin²,
GAO Jin-feng¹, WANG Peng-ke¹, FENG Bai-li¹

(1. College of Agronomy/State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas,

Northwest A & F University, Yangling 712100; China;

2. Hengshan Agricultural Technology Extension Centre in Shanxi Province, Yulin 719100, China)

Abstract The purpose of the study is to investigate the effect of different mulching cultivation on the activity changes of enzymes involved in *Panicum miliaceum* L. grain starch biosynthesis and the characteristics of starch accumulation in grains, to analyze the relationship between them, and to find the best mulching cultivation in arid area. Yu-mi 2 (*Panicum miliaceum* L.) as the material was used in the study which was cultivated under four types of mulching cultivation and one type without mulching (LD). The four types of mulching cultivation include straw mulching (JG), plastic film mulching with two grooves (SG), plastic film mulching with ridging (QL) and plastic film mulching the whole field (QM). The results indicated that the activities of adenosine diphosphate glucose pyrophosphorylase (AGPP), soluble starch synthase (SSS), granule-bound starch synthase (GBSS), and Q enzyme changed in the pattern of a single-peak curve during grain filling stage, the activity peaks of AGPP and GBSS appear in 20 days after the anthesis, and the activity

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(200903007); 国家谷子糜子技术产业体系(CARS-07-12.5-A9)

第一作者: 张艳平, 硕士研究生, E-mail: chuckzhang88@sina.com

通讯作者: 高小丽, 副教授, 主要从事小宗粮豆作物栽培生理生态及资源开发利用研究, E-mail: gao2123@yahoo.com.cn

peaks of SSS and Q enzyme appear in 15 days after the anthesis. The activities of AGPP, SSS, GBSS and Q enzyme were all higher in mulching cultivation than that in LD ($P < 0.05$), the starch content is higher than that in LD cultivation, and the QM cultivation was the best (amylopectin accumulation increased 16.62%, amylase accumulation increased 9.08% and the 1000-grain weight increased 6.16%). The accumulation rate of amylopectin was significantly or highly significantly correlated with the activities of AGPP, SSS and Q enzyme, the accumulation rate of amylose was significantly correlated with the activities of AGPP and GBSS, and the accumulation rate of total starch was significantly or highly significantly correlated with the activities of AGPP, SSS, GBSS and Q enzyme.

Key words *Panicum miliaceum* L.; mulching cultivation; filling stage; enzymes of starch synthesis; amylopectin; amylose

糜子(*Panicum miliaceum* L.)属禾本科黍属(*Panicum miliaceum*),又称黍、稷,生育期短,耐旱、耐瘠薄、适应性强,是我国干旱半干旱地区的主要粮食作物之一。糜子营养丰富,富含蛋白质、淀粉、脂肪、维生素和矿物质;糜子籽粒淀粉质量分数为67.6%~75.1%,可以说糜子籽粒的发育过程就是淀粉的积累过程,而淀粉发育积累主要取决于ADP-葡萄糖焦磷酸化酶(AGPP)、水溶性淀粉合成酶(SSS)、颗粒结合性淀粉合成酶(GBSS)及淀粉分支酶(Q酶)等淀粉合成关键酶的综合作用^[1-2]。研究表明,采用覆膜栽培能有效抑制农田土壤水分蒸发,减少土壤水分的无效损失,提高土壤水分的利用效率,增加作物产量^[3-4]。而土壤的水分含量多少对作物酶活性影响极大,研究表明,水分供给对小麦籽粒淀粉合成相关酶活性关系密切^[5-6];合理的水分胁迫显著提高了水稻灌浆期SSS和Q酶的活性^[7]。目前,水稻、小麦等大宗作物籽粒淀粉积累动态及其酶学机制已有大量研究报道^[8-9],但关于糜子等小宗作物籽粒发育过程中淀粉合成关键酶活性的动态变化及其与淀粉(包括直链淀粉、支链淀粉、总淀粉)积累关系的研究相对较少,且变化规律不甚清楚。

我国糜子多在旱地种植,近年来各地均针对当地气候特征采用地膜、秸秆等不同覆盖栽培模式种植糜子,以充分利用当地自然资源提高籽粒产量和品质^[10]。为探明不同覆盖栽培模式对糜子籽粒淀粉合成酶活性和淀粉积累过程的影响,本研究结合旱地糜子生产实际,设置不同覆盖方式,研究糜子籽粒发育过程中淀粉积累及其淀粉合成关键酶活性的动态变化,探讨淀粉合成与酶活性的关系,旨在为旱作糜子高产优质栽培技术研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及设计

试验于2012年在陕西省横山县农业技术推广

中心站试验地进行,以生产上普遍种植的榆糜2号品种为材料。设置双沟覆膜(SG)、起垄覆膜(QL)、全膜覆盖(QM)、秸秆覆盖(JG)和露地(LD)(对照)5种处理,采用大田小区种植,单因素随机区组排列,小区面积 $2.4\text{ m} \times 5\text{ m} = 12\text{ m}^2$,重复3次。双沟覆膜(SG)和起垄覆膜(QL)为宽窄行距种植,宽行行距40 cm,窄行行距20 cm,垄高10 cm;全膜覆盖(QM)、秸秆覆盖(JG)和露地对照(LD)为等行距种植,行距30 cm。每小区8行,平均行距30 cm,株距10 cm,确保小区种植密度一样,小区周围均设计种植保护行。山旱地,无灌溉条件。播种前整地覆膜,间定苗后覆秸秆

糜子开花期挂牌标记同日开花的穗子,分别于开花后每隔5 d取样一次,直到成熟收获。取样时间在9:00—10:00之间,每次各处理每小区取10穗主穗上部相同位置的籽粒,取够足量籽粒(50粒用于测定灌浆速率,其余用于酶活性及淀粉含量测定)。用于测定酶活性及淀粉含量的籽粒,在液氮中速冻3 min后置于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中,保存待测。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 粗酶液的提取

1)AGPP、SSS和GBSS粗酶液。参照程方民等^[11]的方法,取穗上部相同部位籽粒40粒,去壳称重,碾磨成粉,加4 mL提取液,磨成匀浆,10 000 r/min离心30 min,收集上清液置于冰浴,作为粗酶液备用。沉淀用1 mL提取液洗涤2次后,悬浮于2 mL的提取介质中,用于GBSS活性测定。

2)Q酶粗酶液。取糜子籽粒20粒,加4 mL提取液[含50 mmol/L hepes-NaOH(pH 7.5);5 mmol/L EDTA;1 mmol/L DTT;2 mmol/L KCl;1% pvp-40],研磨匀浆,倒入5 mL离心管,4℃以下15 000 r/min离心15 min,上清液为粗酶液。

1.2.2 酶活性的测定

AGPP、SSS和GBSS酶活性参照 Nakamura

等^[12]的方法进行,以单位籽粒每 h 产生的 NADPH 量为酶活性单位, $\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{grain})$ 。赵法茂等、李太贵等^[13-14]的方法稍作改进后进行,以每降低 1% 碘蓝值为一个酶活性单位,U。

1.2.3 淀粉含量的测定

直、支链淀粉含量测定采用何照范的双波长法^[15]。总淀粉含量为直链淀粉和支链淀粉含量之和。运用 Logistic 方程拟合直链淀粉和支链淀粉的积累过程^[16-17],可得直链淀粉和支链淀粉的积累速率。

1.3 数据处理

所有数据经 Excel 处理和绘制图表,采用 SPSS 21 软件进行相关数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 籽粒灌浆期间淀粉合成关键酶活性的动态变化

2.1.1 AGPP 活性

AGPP 催化 G-1-P 和 ATP 形成 ADPG 作为淀粉合成酶的底物参与直链淀粉和支链淀粉的合成,被认为是淀粉合成的限速酶。从图 1(a)可以看出,籽粒灌浆期间,不同处理 AGPP 活性均呈单峰曲线变化,即 AGPP 活性先迅速增大,达到峰值后逐渐减小,峰值均出现在花后 20 d 左右。但在同一时期不同处理 AGPP 活性大小存在一定差异,结合表 1

可得,花后 10~20 d,覆盖栽培的 AGPP 活性均显著大于露地栽培 ($P<0.05$)。花后 10 d,AGPP 活性为 $\text{QM}>\text{SG}>\text{JG}>\text{QL}>\text{LD}$;花后 15 d,AGPP 活性为 $\text{QM}>\text{SG}>\text{JG}>\text{QL}>\text{LD}$;花后 20 d,AGPP 活性为 $\text{QM}>\text{SG}>\text{QL}>\text{JG}>\text{LD}$ 。

2.1.2 SSS 活性

SSS 是一个葡萄糖转移酶,它以寡聚糖为前体,ADPG 为底物,通过 α -1,4 糖苷键不断增加寡聚糖的葡萄糖单位,最终合成以 α -1,4 糖苷键连接的聚糖。从图 1(b)可以看出,籽粒灌浆期间,不同处理 SSS 活性呈单峰曲线变化,即 SSS 活性先迅速增大,达到峰值后逐渐减小,峰值均出现在花后 15 d 左右,但覆盖栽培的 SSS 活性峰值显著大于露地栽培,表现为 $\text{QM}>\text{SG}>\text{QL}>\text{JG}>\text{LD}$ 。同一时期不同处理之间 SSS 活性大小存在一定差异,结合表 1 可得,花后 5~15 d,覆盖栽培的 SSS 活性均显著大于露地栽培 ($P<0.05$),花后 5 d,SSS 活性 $\text{QM}>\text{JG}>\text{SG}>\text{QL}>\text{LD}$;花后 10 d,SSS 活性为 $\text{QM}>\text{SG}>\text{JG}>\text{QL}>\text{LD}$;花后 15 d,SSS 活性为 $\text{QM}>\text{SG}>\text{QL}>\text{JG}>\text{LD}$ 。花后 20~25 d,露地栽培的 SSS 活性大于覆盖栽培。花后 30~45 d,各处理之间酶活性差异较大,大致表现为灌浆前期活性大的处理在末期活性更低。

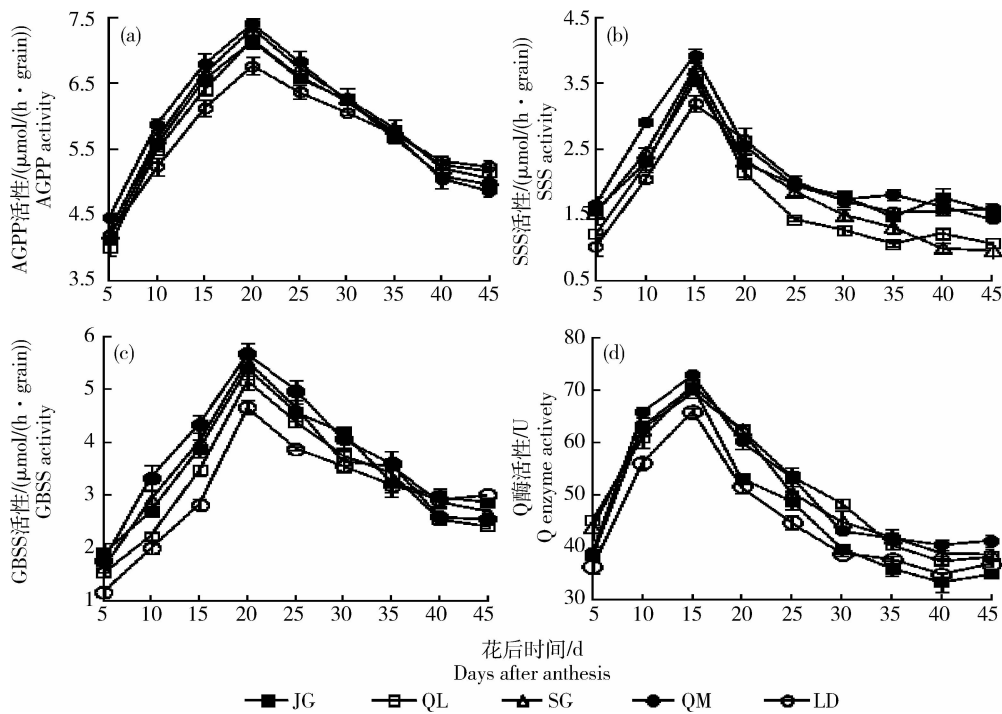


图 1 不同覆盖栽培 AGPP(a)、SSS(b)、GBSS(c)和 Q 酶(d)活性

Fig. 1 AGPP(a), SSS(b), GBSS(c) and Q enzyme(d) activities under different mulching cultivation

表 1 不同覆盖栽培灌浆前、中期酶活性增加率

Table 1 Increase rate of enzyme at different times under different mulching cultivation %

酶 Enzyme	花后时间/d Days after anthesis	LD	JG	QL	SG	QM
GBSS	5	0	62.74	31.37	39.22	50.98
	10	0	34.48	11.49	45.98	67.82
	15	0	37.39	22.76	42.28	53.66
	20	0	15.76	10.84	18.72	21.67
	25	0	17.75	13.02	20.12	28.40
	30	0	18.06	5.16	2.58	14.19
	35	0	1.44	7.19	11.51	12.95
SSS	5	0	53.57	17.86	48.81	61.90
	10	0	12.50	10.12	19.64	41.67
	15	0	10.34	14.18	16.47	22.99
	20	0	−13.42	−18.52	−11.57	−3.24
	25	0	−2.42	−29.09	−7.88	−3.64
	30	0	5.00	−25.71	−12.14	1.43
	35	0	−4.72	−31.49	−14.96	16.53
Q	5	0	5.91	24.02	20.47	7.09
	10	0	12.24	8.67	11.48	17.09
	15	0	7.17	7.61	5.65	10.65
	20	0	3.06	20.83	21.11	16.94
	25	0	9.29	19.55	12.82	19.55
	30	0	2.21	24.72	15.87	11.07
	35	0	−4.56	7.60	11.41	11.03
AGPP	5	0	−1.46	−4.38	1.09	6.20
	10	0	6.72	4.97	8.47	12.27
	15	0	6.99	4.50	8.50	10.99
	20	0	5.43	5.88	8.37	9.50
	25	0	3.36	3.84	5.77	7.21
	30	0	3.28	3.03	3.53	3.03
	35	0	−0.80	0.80	1.60	0.00

2.1.3 GBSS 活性

GBSS 与 SSS 的作用相同,不同的是,GBSS 为颗粒结合型淀粉合成酶,存在于籽粒淀粉粒内部,仅在淀粉粒内部起作用。由图 1(c)可以看出,籽粒灌浆期间,不同处理 GBSS 活性呈单峰曲线变化,即花

后 GBSS 活性迅速增大,花后 20 d 达到峰值,之后逐渐下降。结合表 1 可得,花后 5~25 d 覆盖栽培的 GBSS 活性均显著大于露地栽培($P<0.05$),花后 5 d,GBSS 活性为 $JG>QM>SG>QL>LD$;花后 10~25 d,GBSS 活性为 $QM>SG>JG>QL>$

LD;花后 25 d,GBSS 活性为 QM>JG>SG>QL>LD。

2.1.4 Q 酶

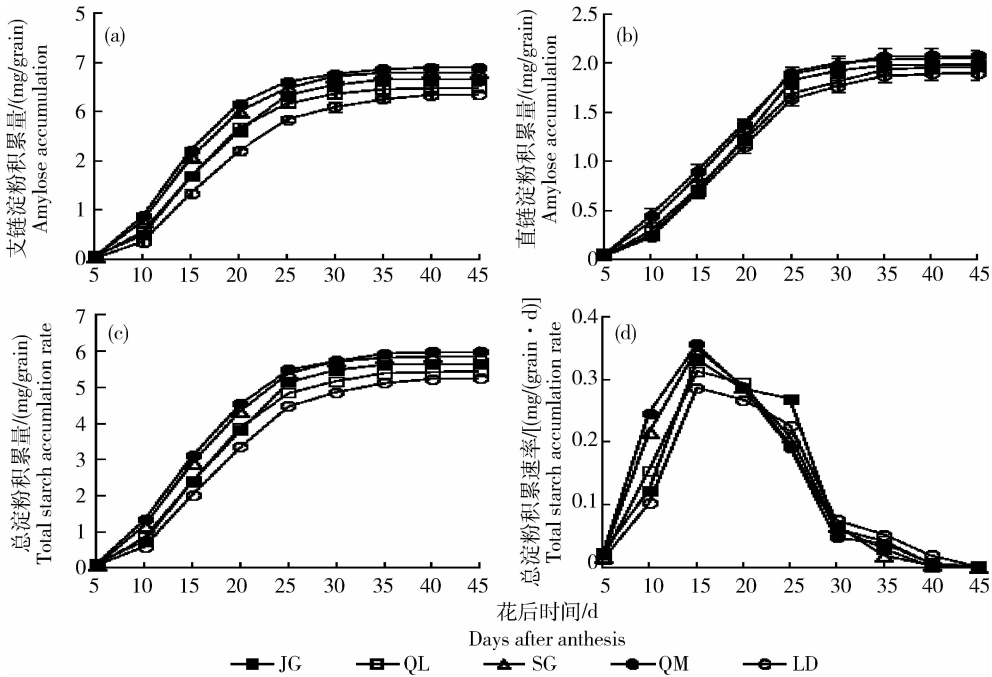
Q 酶的作用是催化切 α -1,4 糖苷键,将释放的葡聚糖的还原端转移到 C₆ 位置上,形成 α -1,6 糖苷键,从而引入支链。从图 1(d)可以看出,籽粒灌浆期间,不同处理 Q 酶活性均表现为先增后减,呈单峰曲线变化,花后 15 d 达到峰值。结合表 1 可得,花后 10~15 d,覆盖栽培的 Q 酶活性显著大于露地栽培($P<0.05$),花后 10 d,Q 酶活性为 QM>JG>

SG>QL>LD;花后 15 d,Q 酶活性为 QM>QL>JG>SG>LD。

2.2 籽粒支、直链淀粉的积累

2.2.1 支链淀粉积累

随花后天数增加,糜子籽粒中支链淀粉的积累均呈 S 型增长趋势(图 2(a)),即随着灌浆进程的推进,支链淀粉积累量不断增加,增加速率先快后慢趋势。支链淀粉积累量在花后 5~10 d 增加缓慢,花后 10~20 d 增加迅速,之后进入缓慢增加期,花后 35 d 以后支链淀粉积累量增加极少。由表 2



(a)支链淀粉 Amylopectin;(b) 直链淀粉 Amylose;(c) 总淀粉 Total starch;(d)总淀粉 Total starch。

图 2 不同覆盖栽培糜子淀粉积累量及积累速率

Fig. 2 Starch accumulation and accumulation rate under different mulching cultivation

表 2 不同覆盖栽培淀粉积累量、千粒质量及其增加率

Table 2 Starch accumulation,1000-grain weight and the increase rate under different mulching cultivation

栽培方式 Cultivation	支链淀粉		直链淀粉		千粒质量/g 1 000-grain weight	千粒质量增加率/% Increase rate of 1 000-grain weight
	积累量/ (mg/grain) Amylopectin accumulation	支链淀粉增加率/% Increase rate of amylopectin	积累量/ (mg/grain) Amylose accumulation	直链淀粉增加率/% Increase of amylose		
JG	3.66	9.20	1.99	4.70	9.03	4.33
QL	3.49	4.10	1.96	2.97	8.75	1.15
SG	3.80	13.52	2.06	8.34	9.13	5.54
QM	3.91	16.62	2.07	9.08	9.18	6.16
LD	3.35		1.90		8.65	

可知,覆盖栽培的支链淀粉积累量均显著大于露地栽培表现为 $QM>SG>JG>QL>LD$,与 LD 比较,支链淀粉积累量的增加率为 $QM>SG>JG>QL$,分别增加 16.62 %、13.52 %、9.2 %和 4.1 %($P<0.05$)。

2.2.2 直链淀粉积累

随花后时间增加,糜子籽粒中支链淀粉的积累均呈 S 型增长趋势(图 2(b)),花后 5~10 d,直链淀粉积累量增加缓慢,花后 10~25 d,直链淀粉积累量增加迅速,花后 35 d 时,直链淀粉积累量基本达到最大。由表 2 可知,直链淀粉积累量表现为 $QM>SG>QL>JG>LD$,与 LD 比较,直链淀粉增加率为

$QM>SG>JG>QL$,分别增加 9.08 %、8.34 %、4.70 %和 2.97 %,但不同栽培条件下直链淀粉积累量差异不显著,可能是直链淀粉的积累受环境因素影响相对较小。

2.3 淀粉酶活性与淀粉积累的关系

相关分析表明(表 3),不同栽培条件下,糜子籽粒总淀粉积累速率与 GBSS、SSS、AGPP 和 Q 酶活性均呈显著或极显著正相关;支链淀粉积累速率与 SSS 和 Q 酶活性均呈极显著正相关,与 AGPP 均呈显著正相关;直链淀粉积累速率与 GBSS 和 AGPP 活性均呈显著或极显著正相关。但淀粉积累速率与

表 3 酶活性与淀粉积累速率的相关性分析
Table 3 Correlation analysis on starch accumulation rate and enzymes activities %

酶 Enzyme	栽培方式 Cultivation	支链淀粉积累速率 Amylopectin accumulation rate	直链淀粉积累速率 Amylose accumulation rate	总淀粉积累速率 Starch accumulation rate
GBSS	JG	0.665	0.770 *	0.716 *
	QL	0.592	0.758 *	0.691 *
	SG	0.609	0.754 *	0.682 *
	QM	0.627	0.790 *	0.701 *
	LD	0.507	0.699 *	0.534
SSS	JG	0.871 **	0.617	0.798 **
	QL	0.897 **	0.658	0.840 **
	SG	0.960 **	0.642	0.921 **
	QM	0.961 **	0.619	0.915 **
	LD	0.931 **	0.615	0.899 **
Q	JG	0.863 **	0.674 *	0.813 **
	QL	0.950 **	0.638	0.935 **
	SG	0.982 **	0.615	0.961 **
	QM	0.981 **	0.664	0.976 **
	LD	0.834 **	0.622	0.802 **
AGPP	JG	0.791 *	0.811 **	0.814 **
	QL	0.713 *	0.811 **	0.762 *
	SG	0.714 *	0.789 *	0.767 *
	QM	0.739 *	0.842 **	0.797 *
	LD	0.761 *	0.784 *	0.777 *

注: **、* 分别代表在 0.01 和 0.05 水平(双侧)上显著相关。
Note: ** and * mean significance at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively.

酶活性之间的相关性几乎不受覆盖方式的影响。

3 讨 论

1)关于作物籽粒灌浆过程中淀粉积累与淀粉合成相关酶之间的关系,前人研究结果表明,淀粉的合成受 AGPP、SSS、GBSS 及 Q 酶等淀粉合成关键酶的综合作用,但研究结论不完全一致。Nakamura 等^[2]、王强等^[18]认为,AGPP 和 Q 酶是籽粒淀粉合成的关键酶。杜晓东等^[19]认为,AGPP、Q 酶和 SSS 与淀粉及其淀粉组分密切相关。Smith 等^[20]认为,GBSS 活性与直链淀粉的合成紧密相关。Mizuno 等^[21]认为,Q 酶对支链淀粉的合成具有重要影响。闫素辉等^[11]认为,支链淀粉积累速率与 AGPP、SSS 和 Q 酶相关,直链淀粉积累速率与 AGPP 和 GBSS 相关。刘霞等^[22]认为,淀粉积累速率与 AGPP 活性关系密切,而与 SSS 和 GBSS 等单个酶活性的大小不存在必然联系。本研究结果表明,糜子籽粒灌浆过程中支链淀粉积累速率与 SSS 和 Q 酶活性呈极显著正相关,与 AGPP 活性呈显著正相关;直链淀粉积累速率与 GBSS 和 AGPP 活性呈显著或极显著正相关;总淀粉积累速率与 AGPP、GBSS、SSS 和 Q 酶活性呈显著或极显著正相关。作物籽粒灌浆过程中淀粉酶活性变化及其与淀粉积累的关系表现不同,可能是由于不同作物种类或不同品种之间淀粉结构不同,具体原因有待进一步探讨。

不同作物以及同种作物不同品种,其籽粒淀粉合成相关酶的变化规律存在异同,前人大量研究表明^[17-26],籽粒淀粉合成相关酶活性均呈先增后减的单峰曲线变化,但不同酶的活性变化存在差异,不同品种,不同栽培处理间,其活性峰值出现时间都存在差异。本研究表明,AGPP、SSS、GBSS 和 Q 酶活性均呈单峰曲线变化,AGPP 和 GBSS 峰值出现在花后 20 d 左右,SSS 和 Q 酶峰值出现在花后 15 d 左右。

2)不同栽培措施对作物的生长具有一定的影响,其中,栽培模式对于淀粉相关酶活性的影响对于作物栽培研究意义重大。Jianchang 等^[7]研究表明,合理的水分胁迫显著提高了水稻灌浆期 SSS 和 Q 酶的活性和灌浆速率。适度水分胁迫处理能使籽粒中 AGPP、SSS 和 Q 酶活性增大,进而增加籽粒淀粉积累和粒重^[23]。李木英等^[24]研究表明,高温胁迫使水稻胚乳 Q 酶活性明显上升。田云录等^[25]研究表明,冬小麦 AGPP 和 Q 酶的活性白天均比夜间

高。戴廷波等^[26]研究表明,高温和水分逆境显著降低了小麦谷蛋白含量及支链淀粉含量,提高了醇溶蛋白含量。近年来覆盖栽培已成为干旱、半干旱地区农作物的主要栽培模式,前人大量研究表明^[27-28],地膜覆盖具有提高土壤含水率,改善作物水分利用,缩短生育期,增加作物产量等作用^[29-30]。本研究表明,覆盖栽培糜子籽粒灌浆前、中期 AGPP、SSS、GBSS 和 Q 酶活性显著大于露地栽培($P < 0.05$),且覆盖栽培籽粒最终淀粉积累量和千粒重大于或显著大于露地栽培,说明覆盖栽培能有效提高籽粒淀粉相关酶活性,促进籽粒灌浆,提高产量。但覆盖栽培没有改变 AGPP、SSS、GBSS 和 Q 酶活性的变化趋势,没有影响酶活性峰值出现时间。

4 结 论

本研究表明,糜子籽粒灌浆过程中籽粒中支链淀粉与 SSS 和 Q 酶呈极显著正相关,与 AGPP 呈显著正相关;直链淀粉与 GBSS 和 AGPP 呈显著或极显著正相关;总淀粉积累速率与 AGPP、SSS、GBSS 和 Q 酶活性呈显著或极显著正相关。覆盖栽培条件下籽粒 AGPP、SSS、GBSS 和 Q 酶活性均显著大于露地栽培,表明覆盖栽培有效提高了糜子籽粒淀粉相关合成酶活性。其中,全膜覆盖栽培的淀粉合成相关酶活性、淀粉积累量和籽粒千粒重均最大,说明全膜覆盖栽培为最优栽培模式,可在陕北及类似糜子产区推广。

参 考 文 献

- [1] 李永庚,于振文,姜东,等.冬小麦旗叶蔗糖和籽粒淀粉合成动态及与其有关的酶活性的研究[J].作物学报,2001,27(5):658-664
- [2] Nakamura Y, Yuki K. Changes in enzyme activities associated with carbohydrate metabolism during the development of rice endosperm[J]. Plant Science, 1992, 82(1): 15-20
- [3] 孙继颖,高聚林,王志刚,等.不同覆膜方式对旱作大豆生理特性及水分利用效率的影响[J].大豆科学,2008,27(2):251-254
- [4] 屈洋,冯佰利.不同节水种植模式对糜子籽粒产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):68-73
- [5] 戴忠民,王振林,高凤菊,等.两种供水条件下两穗型小麦品种籽粒淀粉积累及相关酶活性的变化特征[J].作物学报,2007,33(4):682-685
- [6] 戴忠民,王振林,张敏,等.旱作与节水灌溉对小麦籽粒淀粉积累及相关酶活性变化的影响[J].中国农业科学,2008,41(3):687-694
- [7] Jianchang Y, Jianhua Z, Zhiqin W, et al. Activities of enzymes

- involved in sucrose-to-starch metabolism in rice grains subjected to water stress during filling [J]. *Field Crops Research*, 2003, 81: 69-81
- [8] Pandey M K, Rani N S, Madhav M S, et al. Different isoforms of starch-synthesizing enzymes controlling amylose and amylopectin content in rice (*Oryza sativa* L) [J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30: 1697-1706
- [9] Jeng T L, Tseng T H, Wang C S, et al. Starch biosynthesizing enzymes in developing grains of rice cultivar Tainung 67 and its sodium azide-induced rice mutant [J]. *Field Crops Research*, 2003, 84: 261-269
- [10] 刘广才, 李福, 李城德, 等. 旱地糜子全膜覆土穴播栽培技术 [J]. *宁夏农林科技*, 2013, 54(1): 12-13
- [11] 程方民, 蒋德安, 吴平, 等. 早籼稻籽粒灌浆过程中淀粉合成酶的变化及温度效应特征 [J]. *作物学报*, 2001, 27(2): 201-206
- [12] Nakamura Y, Yuki K, Park S Y, et al. Carbohydrate metabolism in the developing endosperm of rice grains [J]. *Plant Cell Physiol*, 1989, 30(6): 833-839
- [13] 赵法茂, 齐霞, 肖军, 等. 测定淀粉分支酶活性方法的改进 [J]. *植物生理学通讯*, 2007, 43(6): 1167-1169
- [14] 李太贵, 沈波, 陈能, 等. Q 酶在水稻籽粒至白形成中作用的研究 [J]. *作物学报*, 1997, 23(3): 338-344
- [15] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术 [M]. 北京: 农业出版社, 1985: 290-294
- [16] 李世清, 邵明安, 李紫燕, 等. 小麦籽粒灌浆特征及影响因素的研究进展 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(11): 2031-2039
- [17] 闫素辉, 王振林, 戴忠民, 等. 两个直链淀粉含量不同的小麦品种籽粒淀粉合成酶活性与淀粉积累特征的比较 [J]. *作物学报*, 2007, 33(1): 84-89
- [18] 王强, 赵宏伟. 氮素用量对春玉米淀粉合成关键酶的影响 [J]. *玉米科学*, 2008, 16(5): 83-86
- [19] 杜晓东, 赵宏伟, 王敬国, 等. 氮肥运筹对寒地粳稻淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响 [J]. *作物学报*, 2012, 38(1): 159-167
- [20] Smith A M, Denyer K, Martin C R. What controls the amount and structure of starch in storage organs? [J]. *Plant Physiol*, 1995, 107: 673-677
- [21] Mizuno K, Kimura K, Arai Y, et al. Starch branching enzymes from immature rice seeds [J]. *J Biochem*, 1992, 112(5): 643-651
- [22] 刘霞, 姜春明, 郑泽荣, 等. 藁城 8901 和山农 1391 淀粉合成酶活性和淀粉组分积累特征的比较 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(5): 897-903
- [23] 王维, 蔡一霞, 蔡昆争, 等. 水分胁迫对贪青水稻籽粒充实及其淀粉合成关键酶活性的影响 [J]. *作物学报*, 2006, 32(7): 972-979
- [24] 李木英, 石庆华, 胡志红, 等. 高温胁迫对不同早稻品种胚乳淀粉合成酶类活性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1622-1629
- [25] 田云录, 陈金, 董文军, 等. 非对称性增温对冬小麦强势粒和弱势粒淀粉合成关键酶活性的影响 [J]. *作物学报*, 2011, 37(6): 1031-1038
- [26] 戴廷波, 赵辉, 荆奇, 等. 灌浆期高温和水分逆境对冬小麦籽粒蛋白质和淀粉含量的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26(11): 3670-3676
- [27] 刘祖贵, 肖俊夫, 孙景生, 等. 土壤水分与覆盖对夏玉米生长及水分利用效率的影响 [J]. *玉米科学*, 2012, 20(3): 86-91
- [28] 张德奇, 廖允成, 贾志宽, 等. 宁南旱区谷子地膜覆盖的土壤水温效应 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2069-2075
- [29] 张小红, 张绪成. 半干旱区旱地不同覆盖方式对糜子耗水和产量的影响 [J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 29-33
- [30] 董孔军, 杨天育, 何继红, 等. 西北旱作区不同地膜覆盖种植方式对谷子生长发育的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(1): 36-40

责任编辑: 苏燕