

谢裕林,于雅洁,董明辉,等. 茎鞘非结构性碳水化合物积累运转与稻米品质对播期和行距配置的响应[J]. 江苏农业科学,2022,50(8):93-100.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.08.018

# 茎鞘非结构性碳水化合物积累运转与稻米品质 对播期和行距配置的响应

谢裕林<sup>1</sup>, 于雅洁<sup>1</sup>, 董明辉<sup>1,2</sup>, 张文地<sup>2</sup>, 江 贻<sup>2</sup>

(1. 江苏太湖地区农业科学研究所,江苏苏州 215104; 2. 扬州大学江苏省作物栽培生理重点实验室,江苏扬州 225009)

**摘要:**为明确不同类型粳稻非结构性碳水化合物(NSC)积累运转特性及其与稻米品质形成的关系,以当地主栽的不同穗型和生育类型品种(系)为材料,进行4个播期(B1、B2、B3、B4)和2种行距配置处理,以期寻求优质食味品质形成的栽培调控技术途径。结果表明,大穗型水稻茎鞘 NSC 积累、运转和穗质量显著高于常规穗粒兼顾性品种;播期对茎鞘 NSC 积累运转影响较大,除杂交晚粳甬优 1526 成熟期含量无显著差异外,抽穗、成熟期 NSC 含量及转运量、穗干质量表现为 B2 > B1 > B3 > B4, B2 处理均显著或极显著高于其他播期;B2 播期处理 NSC 转运率显著高于其他播期,其他播期品种类型间存在差异;随播期延迟,碾米品质和外观品质变差,直链淀粉含量及蛋白质含量增加,胶稠度含量降低,崩解值、糊化温度以 B2 播期最高, B4 播期最低,消减值趋势相反。与常规行距比较,宽窄行显著增加茎鞘 NSC 含量、转运量和穗干质量,晚熟品种与中熟品种类型间对转运率和籽粒贡献率影响有差异;直链淀粉含量及蛋白质含量增加,崩解值显著增加,胶稠度、消减值和糊化温度显著降低,同时碾米品质和外观品质得到改善。NSC 转运量与多个米质性状指标呈显著或极显著相关, NSC 转运率与垩白度呈显著负相关。品种、行距配置与播期之间交互显著影响 NSC 转运和稻米品质形成。选用适宜的品种、播期和行距配置能较好地协调 NSC 的积累运转,促进籽粒结实与米质改善。本研究为合理安排太湖地区水稻播种期及优化稻米品质提供了理论基础。

**关键词:** 粳稻品种;播期;栽插方式;NSC 积累与运转;稻米品质

**中图分类号:** S511.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)08-0093-08

籽粒结实和稻米品质的优劣与水稻籽粒灌浆有非常密切的关系,籽粒灌浆充实的同化物一部分

来源于抽穗后稻株自身的光合产物,一部分来源于花前贮藏在茎鞘中的非结构性碳水化合物(non-structural carbohydrate,简称 NSC),后者的贡献率可达 30%<sup>[1]</sup>。籽粒开始灌浆后,叶片和茎鞘中贮存的 NSC 以蔗糖的形式经过一系列装卸过程运输至籽粒,在多个淀粉酶的协同作用下合成淀粉,促进籽粒灌浆<sup>[2-3]</sup>,因此促进花前茎鞘积累物质的转运启动和转运量对籽粒初期的生长和籽粒结实有重要作用<sup>[4-5]</sup>。增加抽穗前茎鞘 NSC 的积累,同时提高 NSC 向穗部转运的效率是促进籽粒灌浆、形成高产和优质的重要途径。促进花前茎鞘物质的积累

收稿日期:2021-11-09

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0300102、2017YFD0301206);江苏省六大人才高峰项目(编号:NY-129);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(18)2014];江苏现代农业产业技术体系建设项目(编号:JATS[2020]100);江苏太湖地区农业科学研究所院基金(编号:21011)。

作者简介:谢裕林(1971—),男,江苏如皋人,副研究员,主要从事水稻遗传育种研究。E-mail:719775642@qq.com。

通信作者:董明辉,博士,研究员,主要从事水稻遗传育种研究。E-mail:mhdong@yzu.edu.cn。

[14] 娄善伟,康正华,赵 强,等. 化学封顶高产棉花株型研究[J]. 新疆农业科学,2015,52(7):1328-1333.

[15] 徐守振,左文庆,陈民志,等. 北疆植棉区滴灌量对化学打顶棉花植株农艺性状及产量的影响[J]. 棉花学报,2017,29(4):345-355.

[16] 赵 强,张巨松,周春江,等. 化学打顶对棉花群体容量的拓展效应[J]. 棉花学报,2011,23(5):401-407.

[17] 管利军,孙建亭,王晓伟,等. 不同打顶剂对东疆棉花花铃期生长发育的影响[J]. 安徽农业科学,2014,42(6):1655-1656.

[18] 杨成勋,贺贾盛,杨延龙,等. 化学打顶对棉花冠层结构指标及产量形成的影响[J]. 新疆农业科学,2015,52(7):1243-1250.

[19] 崔建强,孙国军,马 丽,等. 新疆棉花化学打顶剂应用研究[J]. 棉花科学,2015,37(2):30-33.

[20] 苏成付,邱新棉,王世林. 烟草芽抑制剂氟节胺在棉花打顶上的应用[J]. 浙江农业学报,2012,24(4):545-548.

[21] 康正华,赵 强,娄善伟,等. 不同化学打顶剂对棉花农艺及产量性状的影响[J]. 新疆农业科学,2015,52(7):1200-1208.

和转运不仅与品种自身特性有关,也是一个复杂的生理生化过程。抽穗前,茎鞘 NSC 积累主要受叶片中蔗糖磷酸合成酶(SPS)含量的影响<sup>[6]</sup>,适度水分胁迫和减少氮素供应等措施可以提升叶片蔗糖磷酸合成酶活性,进而提高叶片蔗糖输出能力,同时促进花前水稻茎鞘 NSC 积累<sup>[7-9]</sup>。籽粒灌浆结实期淀粉水解并转化为蔗糖,随后茎鞘 NSC 被重新利用<sup>[10]</sup>。抽穗后茎鞘中蔗糖磷酸合成酶的活性迅速上升,茎鞘中淀粉含量则迅速下降<sup>[9]</sup>,籽粒淀粉形成期库的活性增加可促进茎鞘 NSC 向籽粒运转<sup>[4]</sup>。氮肥供应量的改变可以调控水稻茎鞘 NSC 的积累和运转,具体表现为低氮处理条件下,水稻茎鞘内参与淀粉合成与水解相关酶的活性提高,促使茎鞘花前 NSC 积累,并且花后茎鞘 NSC 转运能力得到提升<sup>[11]</sup>;适量氮肥处理会使花前茎鞘 NSC 积累增加,花后茎鞘蔗糖磷酸合成酶活性提高,同时籽粒蔗糖合成酶活性也会相应提高,进而促进茎鞘 NSC 向籽粒运转<sup>[12-13]</sup>。除氮肥外,水分同样参与到水稻茎鞘 NSC 积累与转运的调控过程中,抽穗前浅干湿交替灌溉可促进花前茎鞘 NSC 积累<sup>[14]</sup>,灌浆结实期适度水分胁迫可提高相关酶活性,籽粒库活性增加,促进茎鞘 NSC 活化并向籽粒运输<sup>[15]</sup>。氮肥处理及水分等处理通过调控水稻叶片蔗糖的合成与运输调控水稻茎鞘中 NSC 的积累及转运,但现阶段茎鞘 NSC 积累与转运的内在生理调控机制尚不清晰,生态气候条件与栽培因子间的互作对茎鞘 NSC 的积累与转运的综合效应研究还不多,NSC 的积累转运对稻米品质形成与调控的关系尚不清楚。

因此,本研究选择不同生育类型和库容量的粳稻品种为材料,通过设置不同播期和宽窄行机插方式,研究茎鞘 NSC 积累和运转特性及其与籽粒产量和品质的相关关系,以期进一步探讨 NSC 积累转运的内在生理机制,同时为不同类型品种的丰产优质协同提升提供科学的理论依据和实践指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验时间与地点

2020 年试验田块位于江苏太湖地区农业科学研究所望亭基地(31°27'10"N、120°25'12"E)。试验田前茬为小麦,试验土壤质地为黏土,有机质含量为 23.8 g/kg、速效氮含量为 161.4 mg/kg、速效磷含量为 8.7 mg/kg、速效钾含量为 123.9 mg/kg。

### 1.2 供试品种

以当地主栽的 3 种不同类型粳稻品种为材料,

分别为迟熟中粳稻新品系苏 1785 (V1,全生育期 145 d)、中熟晚粳稻品种苏香粳 100 (V2,全生育期 168 d)、大穗型杂交晚粳稻品种甬优 1526 (V3,全生育期 168 d),常规稻移栽苗数为 2 苗,杂交稻移栽苗数为 1 苗。

### 1.3 试验设计

试验设置播期(B)、品种(V)、行距配置(T)3 种不同处理,采用裂区设计,其中播期为主区,4 个播期分别为 05 - 13 (B1)、05 - 23 (B2)、06 - 02 (B3)、06 - 12 (B4),不同播期播种量相同,且 3 个品种同期栽插,25 d 秧龄移栽;品种为主裂区,3 个品种分别标注为 V1、V2、V3;行距配置为副裂区,分为等行距 30 cm (T1)、宽窄行(T2,宽行与窄行间隔栽插,宽行为 40 cm,窄行为 20 cm),不同行距配置密度一致。

小区面积为 15 m<sup>2</sup> (6 m × 2.5 m),品种小区采取随机排列的方式,2 次重复。主区间做埂隔离,埂体采用塑料薄膜进行覆盖,以确保各品种小区可以进行单独排灌。

各试验小区总施氮量为 270 kg/hm<sup>2</sup>,其中氮磷钾配比为 N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O = 2 : 0.5 : 1,氮肥施用比例为基肥 : 分蘖肥 : 穗肥 = 3 : 4 : 3,分蘖肥和穗肥分 2 次等量施用;磷肥全作基肥;钾肥分基肥、促花肥 2 次等量施用。

水分管理及病虫草害防治等其他相关栽培措施均按照高产栽培要求实施。

### 1.4 测定项目与方法

1.4.1 非结构性碳水化合物样品取样与测定 抽穗期选取试验小区内生长一致的单茎挂牌若干,并于抽穗期和成熟期分别取样 10 个单茎,按照茎鞘、叶片和穗分开烘干,待测 NSC 含量。

将所取样品(抽穗期和成熟期茎鞘烘干样品)粉碎后过 0.15 mm 筛,使用热乙醇法提取可溶性总糖和蔗糖,蒽酮比色法和间苯二酚法分别测定其含量。用高氯酸提取淀粉,蒽酮比色法测定其含量。

NSC 转运量 = 抽穗期 NSC 质量 - 成熟期 NSC 干质量;

NSC 转运率 = NSC 转运量 / 抽穗期 NSC 质量 × 100% ;

NSC 对籽粒贡献率 = NSC 转运量 / 穗干质量 × 100% 。

1.4.2 稻米品质样品取样与测定 每处理成熟期取平均茎蘖数的 5 穴稻株,脱粒后的稻谷置于尼龙

丝沙袋内自然条件风干 2~3 个月后,按中华人民共和国行业标准《米质测定方法》(NY/T 83—2017)测定糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、蛋白质含量、直链淀粉含量、胶稠度等。

### 1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2010 将数据录入,随后采用 DPS 7.05 对所获得的数据进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同播期条件下茎鞘 NSC 积累和转运

从表 1 可以看出,播期对茎鞘中 NSC 含量有较大的影响,在本试验播期条件下,抽穗期、成熟期 2 个时期茎鞘 NSC 含量表现为随播期延迟呈先上升后下降的趋势,以 B2 处理的茎鞘 NSC 含量最高,各

播期间的大小排序为 B2 > B1 > B3 > B4,3 个品种趋势一致;其中,抽穗期 NSC 含量,B2 处理显著高于其他处理,成熟期的 NSC 含量除杂交晚粳甬优 1526 (V3)播期间无显著差异外,其他 2 个品种(V1、V2)播期间差异均达显著水平。穗干质量各播期表现为 B2 > B1 > B3 > B4,其中 B2 与 B4 间差异显著。不同播期下 NSC 转运量与转运率趋势较为一致,除品种苏 1785 (V1)转运率呈现 B2 > B3、B4 > B1 播期外,其他 2 个品种(V2、V3)的 NSC 转运率与 3 个品种 NSC 转运量均表现为 B2 > B1 > B3 > B4 播期,且差异显著。3 个品种茎鞘 NSC 对籽粒的贡献率,品种间略有差异,但 3 个品种适期播期 B2 处理显著高于最晚播期 B4 处理。

表 1 不同播期条件下水稻非结构性碳水化合物变化

品种	播期	NSC 含量(t/hm <sup>2</sup> )		穗干质量 (t/hm <sup>2</sup> )	NSC 转运量 (t/hm <sup>2</sup> )	NSC 转运率 (%)	NSC 对籽粒 贡献率(%)
		抽穗期	成熟期				
V1	B1	1.97b	0.99b	9.35ab	0.98b	49.82b	10.48b
	B2	2.26a	1.08a	10.17a	1.19a	52.40a	11.61a
	B3	1.86c	0.92c	9.16ab	0.95b	50.75b	10.27b
	B4	1.75d	0.87c	8.34b	0.88c	50.49b	10.56b
	平均值	1.96b	0.96b	9.25b	0.99b	50.86a	10.73a
V2	B1	1.98b	0.98b	9.68ab	0.99b	50.42b	10.27ab
	B2	2.22a	1.05a	10.92a	1.17a	52.76a	10.71a
	B3	1.85c	0.94bc	9.00bc	0.92c	49.51b	10.19b
	B4	1.66d	0.89d	7.56c	0.78d	46.39c	10.18b
	平均值	1.92b	0.96b	9.29b	0.96b	49.77b	10.34b
V3	B1	2.49b	1.17a	12.53ab	1.33b	53.32a	10.56ab
	B2	2.65a	1.21a	13.35a	1.44a	54.23a	10.75a
	B3	2.36c	1.18a	11.48b	1.18c	50.00b	10.26ab
	B4	2.18d	1.18a	9.88c	1.01d	46.19c	10.20b
	平均值	2.42a	1.18a	11.81a	1.24a	50.94a	10.44ab

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。表 2 至表 6 同。

### 2.2 不同行距配置条件下 NSC 累积和转运

不同行距配置条件下 NSC 累积转运情况见表 2,行距配置对 3 种不同类型水稻品种的 NSC 累积和转运均有显著影响。在宽窄行栽插方式下,抽穗期及成熟期水稻茎鞘 NSC 含量均显著高于常规行距栽培,3 个品种前者分别比后者高出 8.51%、14.44%、12.5% 和 9.78%、10.87%、9.73%;穗干质量也均表现为宽窄行方式下显著高于常规栽插方式,3 个品种前者比后者分别高出 10.05%、17.33% 和 9.18%。

不同行距配置对 NSC 转运的影响同样存在显

著差异。宽窄行栽培条件下 3 个水稻品种 NSC 转运量均显著高于常规栽培方式,前者比后者分别高出 6.19%、19.32% 和 13.79%;而对 NSC 转运率及 NSC 对籽粒贡献率的影响不同品种间存在差异,结果显示,中熟晚粳苏香粳 100 (V2) 及籼粳杂交甬优 1526 (V3) 在宽窄行栽培条件下的 NSC 转运率及 NSC 对籽粒贡献率高于常规行距栽培,而迟熟中粳苏 1785 (V1) 则呈相反的趋势。

### 2.3 不同播期对稻米品质的影响

从表 3 可以看出,不同播期会对稻米品质产生影响,随着播期的延迟,3 个不同类型品种稻米碾米

表 2 不同行距配置条件下水稻非结构性碳水化合物变化

品种	行距配置	NSC 含量(t/hm <sup>2</sup> )		穗干质量 (t/hm <sup>2</sup> )	NSC 转运量 (t/hm <sup>2</sup> )	NSC 转运率 (%)	NSC 对籽粒 贡献率(%)
		抽穗期	成熟期				
V1	T1	1.88b	0.92b	8.86b	0.97b	51.29a	10.89a
	T2	2.04a	1.01a	9.75a	1.03a	50.44b	10.57b
V2	T1	1.80b	0.92b	8.60b	0.88b	48.75b	10.24b
	T2	2.06a	1.02a	10.09a	1.05a	50.79a	10.44a
V3	T1	2.28b	1.13b	11.22b	1.16b	50.46b	10.32b
	T2	2.57a	1.24a	12.25a	1.32a	51.42a	10.56a

表 3 不同播期条件下稻米外观品质的差异

品种	播期	稻米处理品质(%)				
		糙米率	精米率	整精米率	垩白粒率	垩白度
V1	B1	85.20a	78.67a	73.98a	53.20d	3.70d
	B2	84.60b	77.94b	73.32b	55.00c	4.65c
	B3	84.05c	77.43b	72.28c	57.90b	7.30b
	B4	83.75d	76.70c	70.98d	59.95a	8.85a
V2	B1	85.77a	81.15a	75.95a	52.55d	4.19d
	B2	85.40b	80.17b	75.20b	53.06c	4.75c
	B3	85.20b	79.97b	74.33c	57.66b	5.76b
	B4	84.70c	79.77b	72.74d	59.20a	7.37a
V3	B1	83.25a	75.77a	65.97a	19.20d	2.55d
	B2	82.70b	75.12b	64.37b	20.65c	2.90c
	B3	81.70c	75.07b	63.51c	24.25b	4.15b
	B4	81.85c	74.56b	62.95c	26.65a	5.10a

品质指标值均呈下降趋势,播期越晚碾米品质越差。播期对外观品质有显著影响,随播期延迟垩白度与垩白粒率均显著增加,且不同播期之前存在显著差异,3个品种的趋势一致。

蛋白质含量在不同播期间也存在显著差异,随播期延迟,蛋白质含量逐渐增加。在蒸煮食味品质上,随着播期的推迟,3个不同类型品种直链淀粉含量呈增加趋势,而胶稠度则呈相反的趋势,随播期的推迟,胶稠度数值逐渐下降。播期对淀粉粘滞特性亦产生较大影响,崩解值、糊化温度均表现为在B2播期条件下最高,B4播期条件下最低,总体表现为B2>B3、B1>B4,消减值则表现与崩解值相反的趋势(表4)。

#### 2.4 不同行距配置对稻米品质的影响

从表5可以看出,在宽窄行栽培条件下,稻米的碾米品质指标均显著高于常规栽培方式,3个品种的整精米率则分别高出1.97%、1.04%和3.53%;而外观性状明显改善,垩白粒率显著低于常规行距

栽培,垩白度呈相同趋势,3个品种的垩白粒率和垩白度分别下降了0.12%、1.07%、8.12%和15.79%、6.14%、26.00%。

从表6可以看出,不同行距配置对蛋白质和直链淀粉含量均有较大影响,均表现为宽窄行栽插显著高于常规行距栽插,3个品种蛋白质和直链淀粉前者分别比后者增加6.35%、7.53%、12.80%和4.02%、2.30%、1.17%;胶稠度则表现相反的结果。崩解值亦表现为宽窄行栽插显著高于常规栽插,消减值、糊化温度结果则与之相反。

#### 2.5 非结构性碳水化合物运转与品质性状的相关分析

相关性分析(表7)表明,茎鞘中NSC含量及转运与稻米品质形成关系密切。抽穗期及成熟期NSC含量与整精米率、垩白粒率、垩白度及蛋白质含量呈极显著负相关,与糊化温度、崩解值、消减值呈极显著正相关,抽穗期NSC含量与直链淀粉含量呈显著正相关,成熟期NSC含量与直链淀粉含量呈极显

表 4 不同播期对稻米营养和蒸煮食味品质的差异

品种	播期	蛋白质含量 (%)	直链淀粉含量 (%)	胶稠度 (mm)	崩解值 (cP)	消减值 (cP)	糊化温度 (°C)
V1	B1	7.85d	11.75d	83.50a	1 224.00b	-558.50b	70.35c
	B2	8.20c	12.45c	81.50b	1 252.00a	-609.00d	72.40a
	B3	8.75b	13.10b	78.00c	1 230.50b	-584.50c	71.20b
	B4	9.65a	13.50a	73.75d	1 207.00c	-547.00a	70.15c
V2	B1	8.75d	9.80d	90.75a	1 234.00c	-550.50b	70.05c
	B2	9.57c	10.85c	88.25b	1 269.00a	-597.50d	72.05a
	B3	9.98b	11.2b	82.50c	1 244.50b	-570.00c	71.00b
	B4	10.35a	12.05a	77.50d	1 219.00d	-535.50a	69.50d
V3	B1	7.00d	13.95d	78.25a	1 507.00c	-250.50b	76.65c
	B2	7.30c	14.30c	75.75b	1 534.50a	-297.50d	79.40a
	B3	7.60b	14.85b	70.75c	1 515.50b	-278.50c	77.50b
	B4	8.00a	15.55a	66.00d	1 491.00d	-240.50a	75.80d

表 5 不同行距配置条件下稻米外观品质的差异

品种	行距配置	稻米处理品质 (%)				
		糙米率	精米率	整精米率	垩白粒率	垩白度
V1	T1	84.03b	77.98b	71.93b	56.55a	6.65a
	T2	84.78a	78.02a	73.35a	56.48b	5.60b
V2	T1	85.05b	79.75b	74.18b	56.05a	5.70a
	T2	85.48a	80.68a	74.95a	55.45b	5.35b
V3	T1	82.08b	75.05b	63.10b	23.65a	4.23a
	T2	82.68a	75.23a	65.33a	21.73b	3.13b

与垩白粒率、垩白度及蛋白质含量呈极显著负相关,与消减值呈显著正相关,与崩解值及糊化温度呈极显著正相关。NSC 转运率除与垩白度呈显著负相关之外,与其他稻米品质相关性状不大。NSC 对籽粒贡献率与稻米品质性状的相关性也不显著。

2.6 不同处理及互作对茎鞘 NSC 转运及稻米品质性状的影响

将 3 个品种、行距配置及播期处理与茎鞘 NSC 转运量、转运率及对籽粒的贡献率进行方差分析(表 8),结果显示,品种、行距配置、播期较大地影响

著正相关。NSC 转运量与整精米率呈显著负相关,

表 6 不同行距配置下稻米食味品质的差异

品种	行距配置	蛋白质含量 (%)	直链淀粉含量 (%)	胶稠度 (mm)	崩解值 (cP)	消减值 (cP)	糊化温度 (°C)
V1	T1	8.35b	12.45b	80.13a	1224.00b	-594.50b	71.60a
	T2	8.88a	12.95a	78.25b	1232.75a	-555.00a	70.45b
V2	T1	9.30b	10.85b	85.65a	1217.25b	-576.75b	71.15a
	T2	10.00a	11.10a	83.90b	1266.00a	-550.00a	70.15b
V3	T1	7.03b	14.58b	73.25a	1504.00b	-277.25b	77.98a
	T2	7.93a	14.75a	72.13b	1520.00a	-256.25a	76.70b

表 7 NSC 运转与稻米品质的相关分析

指标	相关系数								
	整精米率	垩白粒率	垩白度	胶稠度	直链淀粉	蛋白质含量	崩解值	消减值	糊化温度
抽穗期 NSC 含量	-0.51**	-0.79**	-0.80**	-0.19	0.45*	-0.60**	0.80**	0.65**	0.75**
成熟期 NSC 含量	-0.63**	-0.85**	-0.78**	-0.37	0.58**	-0.60**	0.87**	0.78**	0.77**
NSC 转运量	-0.41*	-0.70**	-0.77**	-0.07	0.35	-0.57**	0.71**	0.49*	0.70**
NSC 转运率	0.02	-0.23	-0.45*	0.33	-0.05	-0.33	0.22	0.02	0.32
NSC 对籽粒贡献率	0.11	0.03	-0.18	0.18	-0.03	-0.17	-0.03	-0.19	0.09

注: \*、\*\* 分别表示显著( $P < 0.05$ )、极显著( $P < 0.01$ )。表 9 同。

表 8 不同处理及其互作对茎鞘 NSC 转运的影响

指标	均方值						
	品种	行距配置	品种 × 行距配置	播期	品种 × 播期	行距配置 × 播期	品种 × 行距配置 × 播期
抽穗期 NSC 含量	1.221 1 **	0.641 7 **	0.017 2	0.556 5 **	0.004 4	0.007 1	0.002 5
成熟期 NSC 含量	0.258 9 **	0.115 1 **	0.000 7	0.039 5 **	0.006 7 **	0.001 5	0.000 6
NSC 转运量	0.357 5 **	0.213 3 **	0.014 6	0.300 6 **	0.008 1 *	0.004 5 *	0.001 1
NSC 转运率	6.788 7	6.184 9	8.436 3	61.81 **	12.00 4 *	2.244 2	0.771 6
NSC 对籽粒贡献率	0.662 5	0.023 4	0.391 8	1.503 1 **	0.221	0.185 2	0.062 3

了抽穗期与成熟期 NSC 含量及 NSC 转运量,差异达极显著水平;NSC 转运率及 NSC 对籽粒贡献率在不同播期处理下的差异亦达到极显著差异。品种 × 播期互作极显著影响成熟期 NSC 含量,显著影响了 NSC 转运量及 NSC 转运率,行距配置 × 播期互作则显著影响 NSC 的转运量。

将不同处理与品质性状进行方差分析(表 9),结果表明,11 个主要性状在不同品种、行距配置及播期处理下的差异均达到极显著水平,表明稻米品质性状同时受品种、行距配置和播期的影响。分析发现,品种、行距配置、播期 3 因素之间对稻米品质

形成均有互作效应,品种 × 行距配置互作显著或极显著影响了精米率、整精米率、垩白粒率、垩白度、蛋白质含量、崩解值和消减值;品种 × 播期互作显著或极显著影响了糙米率、垩白度、蛋白质含量、直链淀粉含量、崩解值和糊化温度;行距配置 × 播期互作极显著影响了糙米率、垩白度、蛋白质含量和直链淀粉含量;品种 × 行距配置 × 播期之间互作显著或极显著影响了糙米率、垩白度、蛋白质含量和糊化温度。进一步分析表明,垩白度、蛋白质含量 2 个品质性状受不同品种类型和不同处理及互作的影响最大,均达显著或极显著水平。

表 9 不同处理及其互作对稻米品质的影响

品质性状	均方值						
	品种	行距配置	品种 × 行距配置	播期	品种 × 播期	行距配置 × 播期	品种 × 行距配置 × 播期
糙米率	34.867 6 **	4.392 3 **	0.123 4	4.120 9 **	0.199 9 **	0.203 7 **	0.062 5 *
精米率	103.124 3 **	1.350 1 **	1.112 4 **	4.758 6 **	0.199 6	0.152 4	0.168 1
整精米率	485.519 5 **	25.813 3 **	2.200 9 *	20.652 8 **	0.371 1	0.292 5	0.059 6
垩白粒率	5966.284 1 **	8.909 6 **	3.623 6 **	121.802 9 **	0.370 9	0.122 2	0.468 5
垩白度	25.846 0 **	8.509 3 **	0.593 0 *	32.133 3 **	1.821 4 **	0.739 4 **	0.202 9 **
蛋白质含量	19.446 3 **	5.562 4 **	0.133 8 *	4.728 9 **	0.187 3 **	0.090 7 **	0.061 9 **
直链淀粉含量	55.506 4 **	1.356 8 **	0.153 8	7.406 8 **	0.132 2 **	0.177 8 **	0.011 9
胶稠度	583.187 5 **	30.083 3 **	0.645 8	326.694 4 **	3.048 6	0.250 0	0.229 2
崩解值	409 653.270 8 **	7 276.687 5 **	1 800.437 5 **	4 466.409 7 **	14.493 1 *	63.743 1	11.993 1
消减值	487 722.062 5 **	10 179.187 5 **	360.437 5 **	8 555.243 1 **	19.034 7	21.909 7	20.076 4
糊化温度	225.592 6 **	15.629 4 **	0.069 6	17.725 3 **	0.380 3 **	0.095 4	0.385 3 **

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同类型水稻非结构性碳水化合物的积累与运转

作为籽粒灌浆的重要能量物质来源,水稻茎鞘中储藏的非结构性碳水化合物提供了籽粒灌浆所需的重要能量来源,其含量对籽粒产量和品质的形成均有重要调控作用<sup>[16]</sup>。尤其在水稻品种演化过

程中,株型和穗型都发生了系统的变化,NSC 的重新再分配决定了其对籽粒产量形成的重要性;同时,近年来由于气候变化(如全球气候变暖)等环境因素影响及外界非生物逆境等因素,导致籽粒结实和籽粒产量形成的稳定性被破坏<sup>[17]</sup>。本研究条件下,大穗型杂交晚粳品种甬优 1526 群体干物质生长量和颖花量最大,穗籽粒产量最高,其抽穗期和成熟期 NCS 积累量均明显高于 2 个中等穗型常规粳

稻品种, NSC 的转运量和转运率也较高; NSC 的积累和运转与生育类型关系不明显。说明生物量大的品种前期积累的 NSC 量大, 转运到籽粒中的 NSC 量也大。相关研究表明, 与早期品种比较, 现代品种茎鞘 NSC 由于生物量的增加而得到积累。叶片内水解蔗糖的酸性转化酶 (INV) 和蔗糖合成酶 (分解方向) (SSc) 活性低、合成蔗糖的蔗糖合成酶 (合成方向) (SSs) 和蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 活性高会导致 NSC 积累量上升<sup>[18]</sup>。本试验材料均为现代品种, 但大穗型超级稻品种甬优 1526 的 NSC 积累、转运优势更明显, 这是由于作为大库容水稻, 甬优 1526 在抽穗前茎鞘 NSC 积累量高, 同时灌浆结实期 NSC 表现转运量大<sup>[11]</sup>。因大库容量类型水稻源库比率较小<sup>[19]</sup>, 在水稻生长过程中可以通过采取增源的栽培措施来获得高产。

### 3.2 播期和行距配置对非结构性碳水化合物的积累与运转

NSC 的积累量多少与播期有非常密切的关系, 太湖地区无论是不同生育类型品种还是不同穗型品种, 无论是抽穗期和成熟期 NSC 含量、穗干质量, 还是 NSC 的运转量、转运率和对籽粒的贡献率均为 5 月 23 日播期处理最大, 说明播期对 NSC 积累运转的影响非常大。播期是一个综合性的因素, 温度、光照、降水等都是对光合生产有重要影响的生态因子, 但目前的调控机制还不清楚, 相关报道还不多<sup>[20-21]</sup>。与等行距栽插相比, 宽窄行栽插表现出增加稻田透光和通风、减少病虫害、提高水稻抗倒伏能力和水稻产量等优点<sup>[22-23]</sup>。本试验通过宽窄行栽插, 有效地增加了 3 个供试品种抽穗期、成熟期 NSC 的积累量和转运量, 穗干质量显著增加; 但 NSC 的转运率以及对籽粒的贡献率在不同熟期类型品种间有差异, 2 个晚熟粳稻甬优 1526 和苏香粳 100 宽窄行的 NSC 转运率及对籽粒贡献率显著高于常规处理, 迟熟中粳新品系苏 1785 结果则相反。宽窄行栽插将宽行和窄行的综合优势进行了充分的融合, 宽行设置可以增强水稻通风透光能力, 利于水稻生长, 而窄行设置则可以充分利用阳光进行光合作用, 有利于形成高光效水稻群体, 通过宽窄行综合优势的利用, 使水稻中光合产物的积累和运转量提高<sup>[24]</sup>。不同类型品种间 NSC 的转运率有差异, 其机制不甚清晰, 有可能与品种的生育特性和生态适应性有关, 也有可能与品种分蘖特性和穗型有关, 分蘖力强、穗型大的品种在宽行距下通风透光

能力增强, 改善冠层对光能的充分利用, 可以适度协调个体和群体之间的矛盾, 达到优化群体结构的作用, 在该栽插方式下更能挖掘生长潜力<sup>[25]</sup>。

### 3.3 NSC 积累运转与稻米品质形成的关系

前文所述花前储藏在茎鞘中的 NSC 灌浆期被活化后向籽粒运输, 茎鞘中储藏的 NSC 有 70% 左右转运到籽粒中促进籽粒灌浆, 贡献率甚至可达 30% 左右; 灌浆初期, 水稻茎鞘中 NSC 可提高水稻库活性, 启动并促进灌浆, 说明花前茎鞘储藏的 NSC 不仅是灌浆物质, 也与代谢密切相关。在遭遇生物逆境和非生物环境影响后, 光合能力减弱, 在此条件下, 水稻茎鞘中 NSC 的转运对于水稻产量形成及对抗逆境胁迫的作用更加明显<sup>[26]</sup>, 提高茎鞘 NSC 利用率是寻求水稻稳产的重要途径<sup>[27]</sup>。

籽粒灌浆充实好产量高, 稻米品质的优劣同样决定于籽粒灌浆充实状况, 淀粉作为稻米最主要的储藏物质, 其合成量直接影响水稻的产量, 淀粉颗粒的理化特性决定稻米的商品性、蒸煮与食用品质<sup>[28]</sup>。花前茎鞘 NSC 能否有效促进灌浆一方面取决于储藏的 NSC 量, 即光合生产能力, 另一方面取决于是否高效运转, 即同化物向库器官的合理转运能力。从本试验结果分析, 茎鞘 NSC 的转运量与多个稻米品质性状呈显著或极显著相关关系, 说明 NSC 的积累和运转对稻米品质的形成有密切的联系, 但机制尚并不清楚。同时, 不同播期和栽插方式 (宽窄行) 对茎鞘 NSC 积累、运转和稻米品质均有显著的调节效应, 适宜的播期和宽窄行栽插下, 有利于光合同化物的生产, 从而提高茎鞘 NSC 积累量; 灌浆期由于 NSC 既作为灌浆的能量物质来源, 也作为提高库活性的信号物质, 适宜的温光条件有效促进茎鞘中 NSC 向籽粒的转运, 同时在适宜的温光资源和群体结构下叶片光合功能期的延长, 增加了籽粒形成所需的同化物, 籽粒充实良好, 产量和品质能有机协调<sup>[29]</sup>。通过育种或栽培手段协同提茎鞘 NSC 积累、转运和产量、米质协同是可行的。

本研究表明, 与常规穗粒兼顾型粳稻品种比, 大穗型杂交粳稻生物量大、颖花量多, 茎鞘 NSC 积累、运转量和转运率高; 适宜的播期和宽窄行栽插方式条件下, 茎鞘 NSC 积累量和转运量大, 籽粒产量高; 播期和宽窄行栽插显著影响稻米品质的形成, 茎鞘 NSC 含量和运转量与稻米品质密切相关。对 NSC 积累运转和品质形成调控中, 品种、播期和行距配置之间存在互作效应。江苏太湖地区通过

筛选适宜的品种、播期和宽窄行机插方式能较好地协调 NSC 的积累运转,促进籽粒结实与米质改善。

#### 参考文献:

- [1] 潘俊峰,崔克辉,向 镜,等. 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[J]. 华中农业大学学报, 2015,34(1):9-15.
- [2] 王义杰,张绍杰,赖 艳,等. 水稻糖代谢相关酶和糖类转运蛋白编码基因的鉴定和表达分析[J]. 湖北农业科学,2019,58(22):185-193,197.
- [3] 李瑞清,谭瑗瑗,闫 影,等. 水稻胚乳淀粉合成及其育种应用[J]. 核农学报,2019,33(9):1742-1748.
- [4] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, 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(1):69-81.
- [5] Wada H, Masumoto - Kubo C, Tsutsumi K, et al. Turgor - responsive starch phosphorylation in *Oryza sativa* stems; a primary event of starch degradation associated with grain - filling ability [J]. PLoS One, 2017, 12(7):e0181272.
- [6] Ishimaru K, Hirotsu N, Madoka Y, et al. Quantitative trait loci for sucrose, starch, and hexose accumulation before heading in rice[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2007, 45(10/11):799-804.
- [7] Yang J C, Zhang J H, Wang Z Q, et al. Activities of starch hydrolytic enzymes and sucrose - phosphate synthase in the stems of rice subjected to water stress during grain filling [J]. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(364):2169-2179.
- [8] 李国辉,崔克辉. 氮对水稻叶蔗糖磷酸合成酶的影响及其与同化物积累和产量的关系[J]. 植物生理学报, 2018, 54(7):1195-1204.
- [9] Li G H, Hu Q Q, Shi Y G, et al. Low nitrogen application enhances starch - metabolizing enzyme activity and improves accumulation and translocation of non - structural carbohydrates in rice stems [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9:1128.
- [10] Wang G Q, Hao S S, Gao B, et al. Regulation of gene expression in the remobilization of carbon reserves in rice stems during grain filling[J]. Plant and Cell Physiology, 2017, 58(8):1391-1404.
- [11] 潘俊峰,王 博,崔克辉,等. 氮肥对水稻节间和叶鞘非结构性碳水化合物积累转运特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2016, 30(3):273-282.
- [12] Zheng Y M, Ding Y F, Liu Z H, et al. Effects of panicle nitrogen fertilization on non - structural carbohydrate and grain filling in indica rice [J]. Agricultural Sciences in China, 2010, 9(11):1630-1640.
- [13] Liang W X, Zhang Z C, Wen X X, et al. Effect of non - structural carbohydrate accumulation in the stem pre - anthesis on grain filling of wheat inferior grain[J]. Field Crops Research, 2017, 211:66-76.
- [14] Zhang H, Yu C, Kong X S, et al. Progressive integrative crop managements increase grain yield, nitrogen use efficiency and irrigation water productivity in rice [J]. Field Crops Research, 2018, 215:1-11.
- [15] Yang J C, Zhang J H. Crop management techniques to enhance harvest index in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(12):3177-3189.
- [16] Wang D, Wolfrum E J, Virk P, et al. Robust phenotyping strategies for evaluation of stem non - structural carbohydrates (NSC) in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(21):6125-6138.
- [17] Gomez - Zavaglia A, Mejuto J C, Simal - Gandara J. Mitigation of emerging implications of climate change on food production systems [J]. Food Research International, 2020, 134:109256.
- [18] 袁木松. 水稻品种演替过程中茎鞘非结构性碳水化合物积累与转运特征的变化及其机理研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2017.
- [19] Wang X, Dai T B, Jiang D, et al. Yield - formation and source - sink characteristics of rice genotypes under two different eco - environments[J]. The Journal of Applied Ecology, 2005, 16(4):615-619.
- [20] Cai C, Li G, Di L J, et al. The acclimation of leaf photosynthesis of wheat and rice to seasonal temperature changes in T - FACE environments[J]. Global Change Biology, 2020, 26(2):539-556.
- [21] 柳 军,王学林,张玉龙,等. 播期对江淮一季稻生长发育及产量形成的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(22):49-55.
- [22] 孙 良,刘 兵,陈 旋,等. 差速水稻钵苗 Z 字形宽窄行移栽机构设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17):18-27.
- [23] 朱德泉,储婷婷,武立权,等. 宽窄行配置对机插中晚稻生长特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18):102-112.
- [24] Feng L Y, Raza M A, Chen Y K, et al. Narrow - wide row planting pattern improves the light environment and seed yields of intercrop species in relay intercropping system [J]. PLoS One, 2019, 14(2):e0212885.
- [25] 许俊伟,孟天瑶,荆培培,等. 机插密度对不同类型水稻抗倒伏能力及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(11):1767-1776.
- [26] Bagherikia S, Pahlevani M, Yamchi A, et al. Transcript profiling of genes encoding fructan and sucrose metabolism in wheat under terminal drought stress [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(1):148-163.
- [27] Kumar U, Laza M R, Soulié J C, et al. Compensatory phenotypic plasticity in irrigated rice; sequential formation of yield components and simulation with SAMARA model [J]. Field Crops Research, 2016, 193:164-177.
- [28] Zhang C Q, Zhou L H, Lu Y, et al. Changes in the physicochemical properties and starch structures of rice grains upon pre - harvest sprouting[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 234:115893.
- [29] Du B B, Wang Q F, Sun G L, et al. Mapping dynamic QTL dissects the genetic architecture of grain size and grain filling rate at different grain - filling stages in barley [J]. Scientific Reports, 2019, 9:18823.