

# 施氮量对滴灌春小麦茎鞘 NSC 积累与转运的影响

车子强,蒋桂英,王海琪,王荣荣,尹豪杰

(石河子大学农学院,新疆 石河子 832000)

**摘要:**在新疆气候条件下,为明确滴灌春小麦不同茎鞘节位果聚糖和 NSC 向籽粒转运提高产量的氮素响应机制,采用裂区试验设计,以强筋小麦‘新春 37 号’(XC37)、中筋小麦‘新春 6 号’(XC6)为主区,分别以施氮量 300、255、210、0 kg·hm<sup>-2</sup>为副区,研究施氮量对滴灌春小麦茎鞘不同节位(穗下节间、倒二节间、其余节间)果聚糖和非结构碳水化合物(NSC)的积累转运及其对产量贡献的影响。结果表明,随生育期的推进,两个品种春小麦茎鞘蔗糖果糖基转移酶(SST)活性、果聚糖含量、NSC 含量及茎鞘干物质质量呈先升后降的变化趋势,而果聚糖外水解酶(FEH)活性则为先降后升再降的趋势,各指标均以施氮量 255 kg·hm<sup>-2</sup>处理表现最优;各节位相比,其余节果聚糖代谢酶活性、果聚糖含量、NSC 含量以及茎鞘干物质质量最大,其果聚糖、NSC 以及茎鞘干物质对产量贡献率分别比倒二节高 11.18%~35.77%、14.77%~45.65%和 25.81%~33.83%;两品种比较,XC37 茎鞘中贮藏物质积累运转效率高于 XC6,其果聚糖、NSC 以及茎鞘干物质对产量贡献率分别比 XC6 高 32.53%~116.74%、26.06%~35.26%和 6.32%~21.73%;施氮量与品种互作效应对果聚糖、NSC 花前转运率和贡献率及其穗下节干物质对产量贡献率均有显著影响。研究表明,果聚糖和 NSC 代谢及产量在施氮量为 255 kg·hm<sup>-2</sup>时表现最佳,该施氮量是新疆滴灌春小麦适宜的施氮水平。

**关键词:**春小麦;滴灌;施氮量;茎鞘节位;果聚糖;NSC

**中图分类号:**S512.1<sup>+</sup>2;S365;Q945.18 **文献标志码:**A

## Effects of nitrogen application rate on NSC accumulation and translocation in stem sheath of spring wheat under drip irrigation

CHE Ziqiang, JIANG Guiying, WANG Haiqi, WANG Rongrong, YIN Haojie

(College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** In order to clarify the nitrogen response mechanism of fructan and NSC transport to grain under drip irrigation in spring wheat, a split-plot experiment was conducted with strong sinew wheat ‘Xinchun 37’ (XC37) and middle sinew wheat ‘Xinchun 6’ (XC6) as the main plots. We examined the effects of nitrogen application rates of 300, 255, 210 kg·hm<sup>-2</sup> and 0 kg·hm<sup>-2</sup> on the accumulation and transport of fructose and NSC and their contribution to yield at different nodes of stem and sheathe (peduncle internode, penultimate internode, and other internodes) of spring wheat under drip irrigation. The results showed that the activities of sucrose fructosyl transferase (SST), fructan content, NSC content and stem sheath dry matter weight of the two varieties of spring wheat increased first and then decreased, while the activity of exofructan hydrolase (FEH) decreased first and then increased and then decreased, each index had the best performance of 255 kg·hm<sup>-2</sup>. The activity of fructan metabolizing enzyme, fructan content, NSC content and stem sheath dry matter weight of the other internodes were the highest, and the contribution rate of fructan, NSC and stem sheath dry matter to yield was 11.18%~35.77%, 14.77%~45.65% and 25.81%~33.83% higher than that of the penultimate internode, respectively. Compared with XC6, the efficiency of storage material accumulation in stem sheath of XC37 was higher than that of XC6. The contri-

bution rate of fructans, NSC and stem sheath dry matter to yield of XC37 was 32.53%~116.74%, 26.06%~35.26% and 6.32%~21.73% higher than that of XC6, respectively. The interaction effect between nitrogen application rate and variety had significant effects on the preanthesis transport rate and contribution rate of fructan, NSC pre-flower transport and the contribution rate of dry matter of peduncle internode to yield. In conclusion, the metabolism and yield of fructan and NSC were the best when the nitrogen application level was 255 kg · hm<sup>-2</sup>, which was the appropriate nitrogen application level for spring wheat under drip irrigation in Xinjiang.

**Keywords:** spring wheat; drip irrigation; nitrogen amount; stem sheath node; fructan; non-structural carbohydrates

促进光合产物向籽粒转运是禾谷类作物高效生产的关键,阐明光合产物向籽粒转运,特别是花前和花后临时贮藏在营养器官的光合产物向籽粒转运的调控机制,对解决目前小麦生产上存在的高施氮水平下茎鞘中光合产物向籽粒转运率低、籽粒灌浆慢等问题具有十分重要的理论和实践意义<sup>[1]</sup>。小麦开花前和开花后,在茎鞘临时贮存并可转运的光合产物称为非结构碳水化合物(Nonstructural carbohydrate, NSC),其主要成分是果聚糖,含量占茎秆总干质量的 40%以上,果聚糖的代谢调控茎鞘 NSC 积累和再运转<sup>[2]</sup>,对于缓和植株源叶片光合产物供应与籽粒库光合产物需求之间的矛盾,维持较高的籽粒灌浆速率具有重要作用<sup>[3]</sup>。

施用氮肥是协调作物源-库关系、影响作物产量形成的重要栽培措施。合理的氮肥供给有利于促进小麦籽粒灌浆中后期茎鞘中积累的 NSC 向籽粒输出,给籽粒灌浆提供所需营养,影响其粒重和产量<sup>[4]</sup>。研究发现,开花前小麦茎鞘中贮藏物质对产量的贡献率为 3%~30%,开花后小麦茎鞘中的暂贮物对产量的贡献占籽粒干物质的 10%~25%<sup>[5]</sup>。潘俊峰等<sup>[6]</sup>研究发现,长江中下游麦区低氮处理(50 kg · hm<sup>-2</sup>)增加了茎鞘花前 NSC 的积累以及花后 NSC 向籽粒的转运;Liang 等<sup>[7]</sup>研究发现,在中国北部冬麦区,适宜的施氮量(180 kg · hm<sup>-2</sup>)显著提高了花前茎鞘中 NSC 含量,促进弱势粒库强和灌浆速率,而过量施氮显著降低了花前茎鞘 NSC 积累量,抑制了小麦弱势粒库强和灌浆速率。茎鞘中存在着聚合度(Degree of polymerization, DP)不同的果聚糖<sup>[8-9]</sup>,其中 DP ≥ 4 的果聚糖聚合度较高,其含量与聚合程度可反映营养器官中光合产物积累与贮藏的能力<sup>[10]</sup>。当植株茎鞘干物质质量降低时,蔗糖果糖基转移酶(SST)催化蔗糖合成果聚糖(DP = 3),此为果聚糖合成的第一步<sup>[11]</sup>,同时也是控制碳素向果聚糖库分配的关键<sup>[12]</sup>,果聚糖果糖基转移酶(FFT)则通过使果聚糖链长增加,进一步催化 DP ≥ 4 的果聚糖合成,其后在果聚糖外水解酶(FEH)催

化下分解转运至作物籽粒<sup>[13]</sup>。姜东等<sup>[11]</sup>在华北麦区发现,当施氮量介于 210~330 kg · hm<sup>-2</sup>时,小麦茎鞘中 SST 活性随施氮量的增加而增大,有利于茎鞘中 DP ≥ 4 果聚糖含量的积累,但 FEH 酶活性受到抑制,使成熟期小麦茎鞘中果聚糖分解与转运受阻。Guo 等<sup>[14]</sup>研究也发现施氮量过多会导致茎鞘中果聚糖积累与转运受到抑制,而适宜的氮肥施用量可促使茎鞘中果聚糖的积累及转运。可见,施氮量可不同程度调控茎鞘中 NSC 和果聚糖代谢及籽粒产量形成。

滴灌是新疆麦区的主要灌溉技术,因施肥和灌水方式不同,滴灌麦区的田间气候等条件与其他麦区存在差异,光合产物的积累与转运也明显不同<sup>[15]</sup>,且新疆小麦生产中长期追求高肥高产,氮肥施用量常年保持在 300 kg · hm<sup>-2</sup>,氮肥的持续高投入不仅使种植成本增加,还造成了环境污染<sup>[16-17]</sup>。在新疆田间滴灌条件下,如何协调施氮量、果聚糖、NSC 以及小麦产量之间的关系,促进茎鞘中果聚糖和 NSC 向小麦籽粒高效转运以提高小麦产量仍未有定论。因此,本试验以当地主栽小麦品种为材料,通过设置不同施氮水平,利用 HPLC 技术,探究滴灌春小麦茎鞘中 DP ≥ 4 果聚糖和 NSC 的代谢特征,分析花后小麦茎鞘中 DP ≥ 4 果聚糖和 NSC 积累与转运及其对籽粒产量贡献的动态规律,以期为新疆滴灌小麦氮肥优化施用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2021 年 4—7 月在新疆石河子大学农学院实验站(85°59'E, 44°18'N)进行,该地区多年平均气温为 7.5~8.2℃,多年平均降水量 208 mm,多年平均蒸发量 1 660 mm,属于典型的大陆性气候。2021 年 4—7 月小麦生育期间平均日最高气温、日最低气温和逐日降水量变化如图 1 所示。供试土壤类型为灌溉灰漠土,供试 0~40 cm 土层土壤基本性状如表 1。

## 1.2 试验设计

供试小麦品种为强筋型‘新春37号’(XC37,蛋白质含量16.3%)和中筋型‘新春6号’(XC6,蛋白质含量13.5%)。试验采用裂区设计,品种为主区,氮素为副区,设置4种氮肥处理:CK1(300 kg·hm<sup>-2</sup>)、A1(255 kg·hm<sup>-2</sup>)、B1(210 kg·hm<sup>-2</sup>)、CK2(0 kg·hm<sup>-2</sup>),各处理具体氮肥施用量如表2所示。

小区种植面积为12 m<sup>2</sup>(3 m×4 m),各小区间埋置100 cm深度的防渗膜,防止肥料外渗。氮肥基追比例为2:8,播前各小区将20%氮肥(尿素,N 46%)和120 kg·hm<sup>-2</sup>的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(过磷酸钙,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)作基肥翻耕于土壤;其余氮肥按不同比例在各生育期随滴灌水施入土壤。

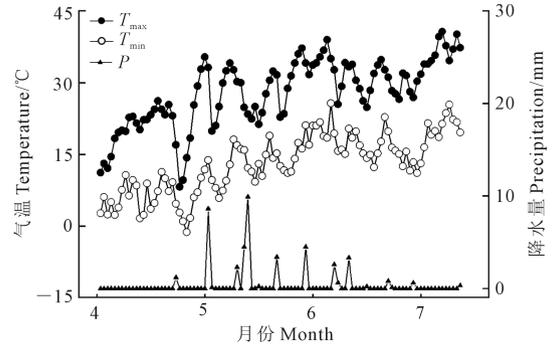


图1 小麦生育期平均日最高气温( $T_{\max}$ )、平均日最低气温( $T_{\min}$ )和逐日降水量( $P$ )变化

Fig.1 Changes of mean daily maximum temperature ( $T_{\max}$ ), mean daily minimum temperature ( $T_{\min}$ ) and daily precipitation ( $P$ ) during wheat growth period

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the experimental soil

土层深度 Soil depth /cm	全氮含量 Total nitrogen content/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮含量 Alkaline hydrolysis nitrogen content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷含量 Available phosphorus content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾含量 Available potassium content/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质含量 Organic matter content/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH
0~40	1.27	55.71	15.96	132.02	12.84	7.7

表2 不同处理氮肥施用量/(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Nitrogen fertilizer application amount of different treatments

处理 Treatment	施氮量 Nitrogen application amount	基肥 Base fertilizer	追肥 Top dressing					
			两叶一心期 Two-leaf one- hearted stage	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	扬花期 Flowering stage	乳熟期 Milky maturity stage
CK1	300	60	24.0	24.0	96.0	48.0	36.0	12.0
A1	255	51	20.4	20.4	81.6	40.8	30.6	10.2
B1	210	42	16.8	16.8	67.2	33.6	25.2	8.4
CK2	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

生育期间灌溉量为6 000 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>,共灌水9次,各个时期的灌水量通过水表精确控制。小麦于2021年4月4日播种,播种量为345 kg·hm<sup>-2</sup>,采用“宽窄行”、“一管4行”的种植方式,行间距为12.5 cm+20 cm+12.5 cm+15 cm,滴灌带(管径16 mm,滴头间距30 cm,流量2.6 L·h<sup>-1</sup>)放置在20 cm的宽行;2021年7月7日收获,其他田间管理同大田生产。

## 1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎鞘果聚糖代谢酶活性的测定 于开花期、乳熟期、蜡熟期和成熟期取同一日开花的小麦,每个处理选取5株,将茎鞘按穗下节间、倒二节间和其余节间3个节位分样,鲜样置入液氮,-80℃下保存,用于测定果聚糖代谢酶活性。蔗糖果聚糖转移酶(SST)和果聚糖外水解酶(FEH)活性测定参照Verspreet等<sup>[18]</sup>的方法。

1.3.2 茎鞘果聚糖(DP≥4)和NSC含量的测定及计算 取样时间同1.3.1小节。每个处理选取10株

单茎,分别剪取茎鞘倒二节间和其余节间,5株用于测定果聚糖(DP≥4)含量,另外5株用于测定NSC含量。果聚糖(DP≥4)和NSC含量使用高效液相色谱法(HPLC)测定,具体参照姜东等<sup>[19]</sup>的方法。测定使用安捷伦1200系列液相色谱仪,色谱柱为艾杰尔Bonshell ASB C18(150 mm×2.1 mm,1.7 μm),以0.1%三乙胺-乙腈溶液进行梯度洗脱流动相,柱温为28℃,流速为1 mL·min<sup>-1</sup>,漂移管温度为75℃,气体压力为40 psi,喷雾器模式加热,动力水平为60%。参照马召朋等<sup>[20]</sup>的方法计算果聚糖以及NSC花前、花后转运、贡献率和绝对含量,果聚糖各指标计算方法如下:

花前转运率(%)=(花后当天果聚糖绝对含量-成熟期果聚糖绝对含量)/花后当天果聚糖绝对含量×100%

花后转运率(%)=(最大果聚糖绝对含量-花后当天果聚糖绝对含量)/最大果聚糖绝对含量

×100%

花前贡献率(%) = (花后当天果聚糖绝对含量 - 成熟期果聚糖绝对含量) / (1000 × 主穗粒重) × 100%

花后贡献率(%) = (最大果聚糖绝对含量 - 花后当天果聚糖绝对含量) / (1000 × 主穗粒重) × 100%

绝对含量(mg · g<sup>-1</sup>) = 果聚糖浓度 × 干物质质量

NSC 花前和花后转运率及其贡献率计算公式同果聚糖。

1.3.3 茎鞘干物质质量测定及相关指标的计算 于小麦开花期和成熟期分别取具有代表性的 10 株小麦,按照穗下节、倒二节和其余节 3 个节位分别置于 105℃ 烘箱杀青 30 min,70℃ 烘干至恒重后称重,即为茎鞘不同节位干物质质量。茎鞘中干物质的积累与转运及其对小麦产量的贡献率按照王茂莹等<sup>[21]</sup>的方法进行计算。

花前贮藏物质运转量(kg · hm<sup>-2</sup>) = 开花期干质量 - 成熟期干质量

花前干物质转移效率(%) = 花前贮藏物质运转量 / 开花期干质量 × 100%

花前物质运转贡献率(%) = 花前贮藏物质运转量 / 成熟期籽粒干质量 × 100%

花后物质积累量(kg · hm<sup>-2</sup>) = 成熟期籽粒干质量 - 花前贮藏物质运转量

花后干物质转移效率(%) = 花后贮藏物质运转量 / 开花期干质量 × 100%

花后积累贡献率(%) = 花后物质积累量 / 成熟期籽粒干质量 × 100%

1.3.4 产量的测定 于小麦成熟期每个处理小区随机选取 1 m<sup>2</sup>的样方,将植株全部收割后自然晾干,称籽粒重量,计算产量;同时测定 1 m<sup>2</sup>样方内小麦穗数,从中随机选取 20 株测定穗粒数和千粒重,重复 3 次。

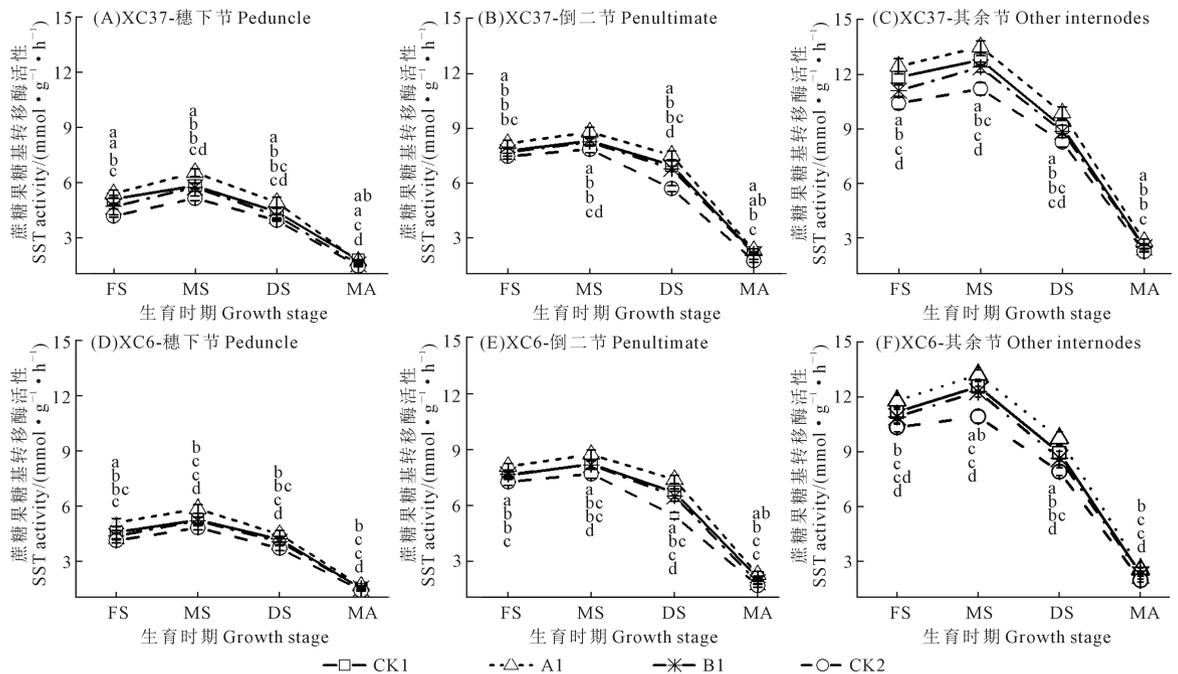
## 1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2018 进行数据处理和图表绘制,利用 SPSS 进行统计分析,运用 Duncan 及 LSD 方法进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮处理下春小麦茎鞘果聚糖代谢关键酶活性的变化

由图 2 可知,不同施氮处理下两个品种不同茎鞘节位 SST 活性均随生育进程推进呈先升后降变化趋势,乳熟期最大。节位、施氮量和品种不同,SST 活性变化也不同。各品种相同施氮量下,A1 处理其余节 SST 活性最高,分别比例二节、穗下节高 15.02%~53.44%、52.11%~106.26%。各品种相同节位下,除开花期和蜡熟期外,其余生育时期各施氮处理



注:FS:开花期;MS:乳熟期;DS:蜡熟期,MA:成熟期。图中不同小写字母代表两品种在同一时期不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note:FS: Flowering stage; MS: Milky maturity stage; DS: Dough stage; MA: Maturity stage. Different lowercase letters represent significant differences ( $P < 0.05$ ) between two varieties in different treatments at the same time. The same as below.

图 2 施氮处理对滴灌春小麦不同节位 SST 活性的影响

Fig.2 Effects of different nitrogen application on SST activity at different nodes of spring wheat under drip irrigation

SST 活性均显著高于 CK2, 表现为 A1>CK1>B1>CK2;各生育时期 A1 处理其余节 SST 活性均显著高于 CK1、B1、CK2 处理,增幅分别为 5.59%~10.13%、8.97%~13.16%、20.48%~30.24%。同一节位不同品种之间,A1 处理其余节中 SST 活性 XC37 比 XC6 高 2.20%~9.67%。综上可知施氮量能显著影响小麦各节位 SST 活性变化,影响效果因品种、节位和生育时期而异;两个品种(XC37 和 XC6)SST 活性均为 A1 处理(施氮量为 255 kg·hm<sup>-2</sup>)在整个生育期综合表现较优。

由图 3 可知,不同施氮量下,两个品种各茎鞘节位的 FEH 活性均呈“谷-峰-谷”的变化趋势,乳熟期、成熟期低谷,蜡熟期达峰值。同一生育时期各节位 FEH 活性随施氮量降低呈先升后降变化,A1 处理在蜡熟期可保持较高的果聚糖分解能力(FEH 活性为 26.43~85.69 mmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>),CK1 处理则使 FEH 活性显著降低(20.57~77.86 mmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>)。节位、施氮量和品种不同,FEH 活性变化也有所不同。各品种相同施氮量下,A1 处理 FEH 活性在其余节最高,分别比倒二节和穗下节提高 11.38%~29.78%和 37.87%~57.39%。各品种相同节位下,除开花期外,A1 处理其余节 FEH 活性均显著高于 CK1、B1、CK2 处理,增幅分别为 10.06%~21.50%、13.61%~30.87%、20.96%~44.84%。同一节位相同施氮量下,XC37 品种 A1 处理其余节 FEH 活性比

XC6 高 2.67%~5.88%。综上可知,两个品种 FEH 活性均为 A1 处理在整个生育期综合表现较优。

### 2.2 不同施氮处理下春小麦茎鞘果聚糖含量和 NSC 含量的变化

不同施氮量下,倒二节和其余节中 DP≥4 果聚糖含量(图 4)和 NSC 含量(图 5)均随施氮量的增加先增后降,表现为 A1>CK1>B1>CK2(乳熟期除外),说明 A1 处理可有效提高茎鞘中果聚糖供应,CK1 处理则导致果聚糖供应水平降低。节位、施氮量和品种不同,果聚糖和 NSC 含量变化也有所不同。

如图 4 所示,茎鞘中 DP≥4 果聚糖含量随生育时期推进呈先增后降的倒“V”趋势,乳熟期最高,成熟期最低。各品种相同施氮量下,A1 处理开花~成熟期其余节 DP≥4 果聚糖含量均高于倒二节,增幅为 5.89%~9.59%,且在开花~蜡熟期差异明显,成熟期差距逐渐缩小。各品种相同节位下,A1 处理其余节中果聚糖含量分别比 CK1、B1、CK2 显著高 12.46%~22.18%、13.74%~25.51%、51.35%~139.14%,倒二节中分别高 27.62%~29.61%、35.75%~36.57%、87.13%~124.01%。同一节位相同施氮量下,XC37 品种 A1 处理其余节果聚糖含量比 XC6 高 6.80%~17.01%。

如图 5 所示,适当降低施氮量可提高茎鞘中 NSC 供应,过高或过低施氮量则降低 NSC 含量。各品种相同施氮量下,A1 处理各节位 NSC 变化规律与

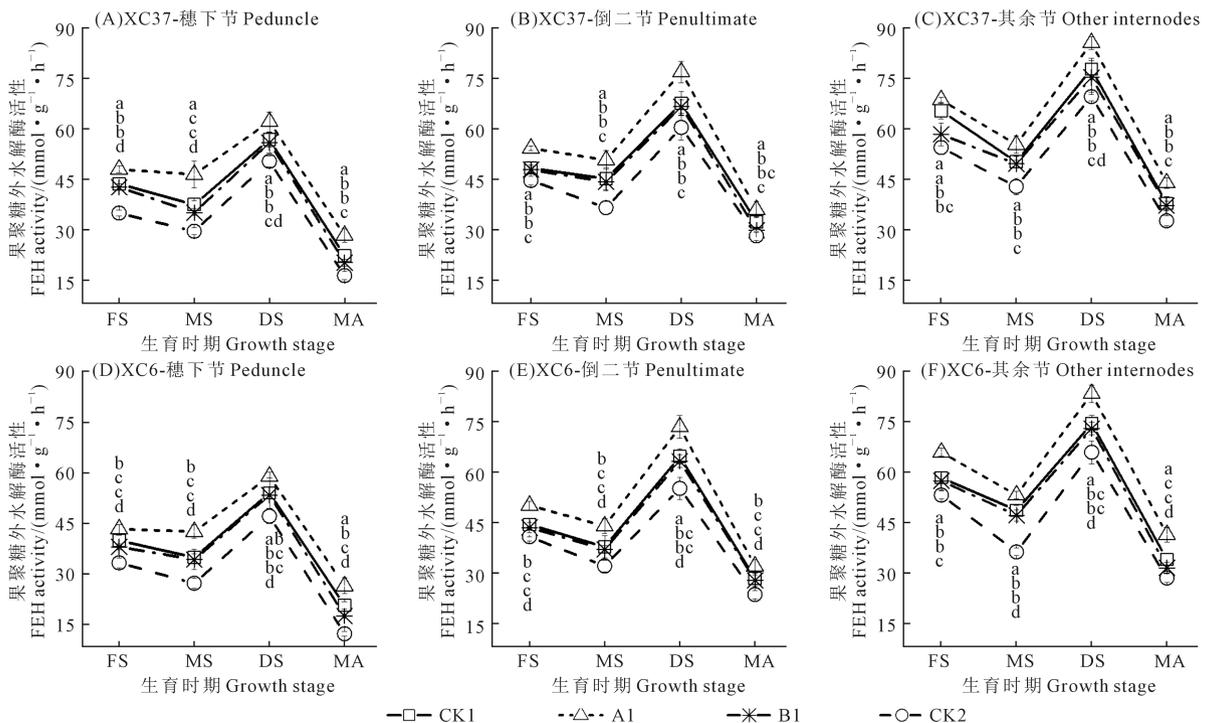


图 3 施氮处理对滴灌春小麦不同节位 FEH 活性的影响

Fig.3 Effects of different nitrogen application on FEH activity at different nodes of spring wheat under drip irrigation

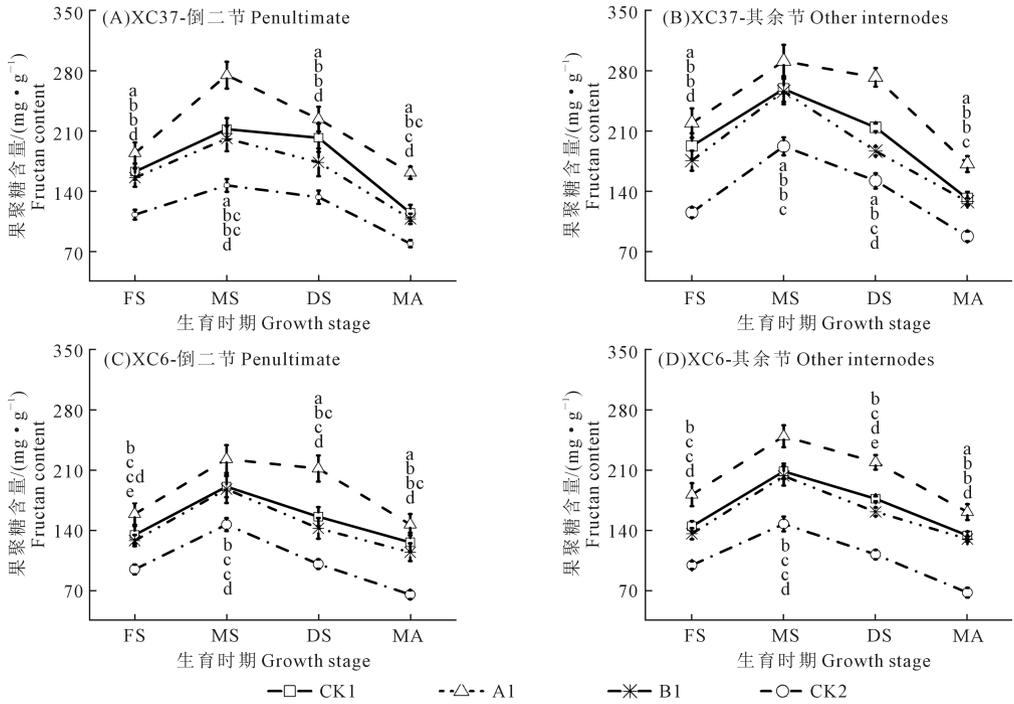


图 4 施氮处理对滴灌春小麦不同节位果聚糖含量 (DP≥4) 的影响

Fig.4 Effects of different nitrogen application on fructan content (DP≥4) at different nodes of spring wheat under drip irrigation

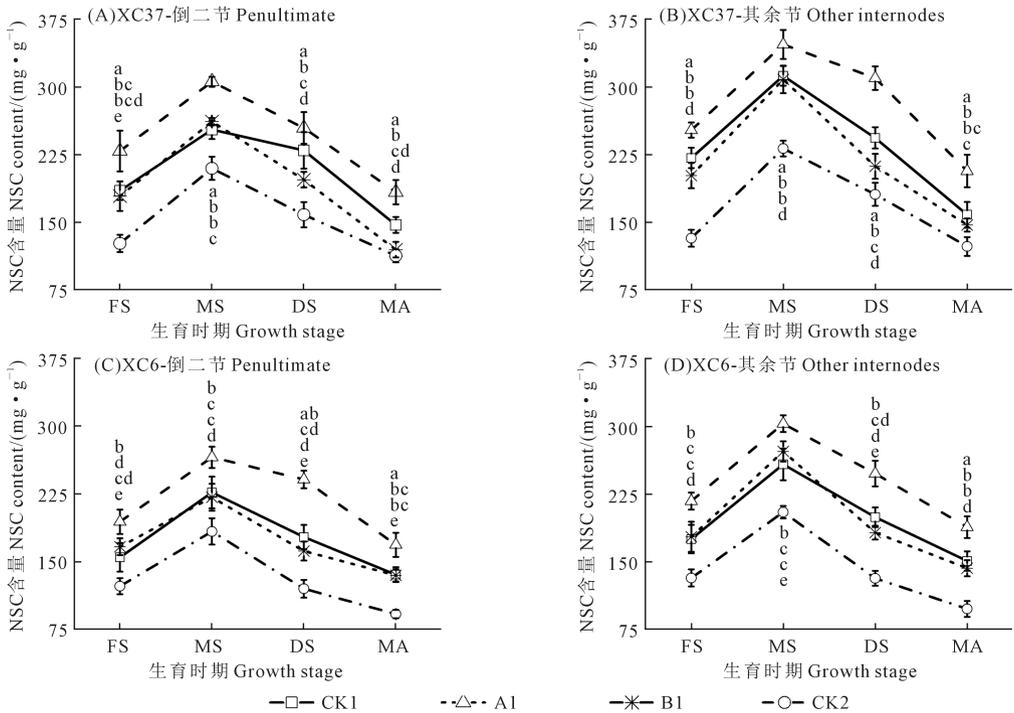


图 5 施氮处理对滴灌春小麦不同节位 NSC 含量的影响

Fig.5 Effects of different nitrogen application on NSC content at different nodes of spring wheat under drip irrigation

果聚糖相同,表现为整个生育期其余节高于倒二节,增幅为 12.17%~13.45%,开花~蜡熟期两节位差异较大,成熟期差异较小。各品种相同节位下,其余节中 A1 处理 NSC 含量分别比 CK1、B1、CK2 显

著高 11.12%~24.63%、12.52%~31.49%、49.55%~91.31%,倒二节中分别显著高 20.97%~24.24%、16.84%~40.43%、45.55%~82.81%。同一节位相同施氮量下,XC37 品种 A1 处理其余节 NSC 含量比 XC6

高 9.37%~12.43%。综上可知,两个品种果聚糖和 NSC 含量均为 A1 处理在整个生育期综合表现较优。

### 2.3 不同施氮处理下春小麦茎鞘干物质质量及产量的变化

由图 6 可知,不同施氮量下各节位茎鞘干物质质量均随生育进程推进呈先升后降变化,乳熟期最大,此时 A1 处理各节位茎鞘干物质质量均显著高于 CK2,穗下节、倒二节、其余节分别高 20.34%~23.18%、22.53%~26.50%、46.54%~47.55%。各品种相同施氮量下,A1 处理茎鞘干物质质量以其余节最高,倒二节其次,穗下节最低,前者较后两者分别高

24.41%~44.13%、52.09%~60.57%。各品种相同节位下,除成熟期外,A1 处理其余节茎鞘干物质质量显著高于 CK1、B1、CK2,增幅分别为 10.09%~24.31%、12.47%~30.08%、46.54%~66.68%;同一节位相同施氮量下,A1 处理其余节茎鞘干物质质量 XC37 比 XC6 高 4.63%~6.32%。综上可知,两个品种在整个生育期茎鞘干物质质量均为 A1 处理综合表现较优。

由表 3 可知,品种对小麦穗数及产量有显著影响,施氮量对小麦产量及其构成因子有极显著影响 ( $P<0.01$ ),施氮量与品种互作对两品种产量及其构

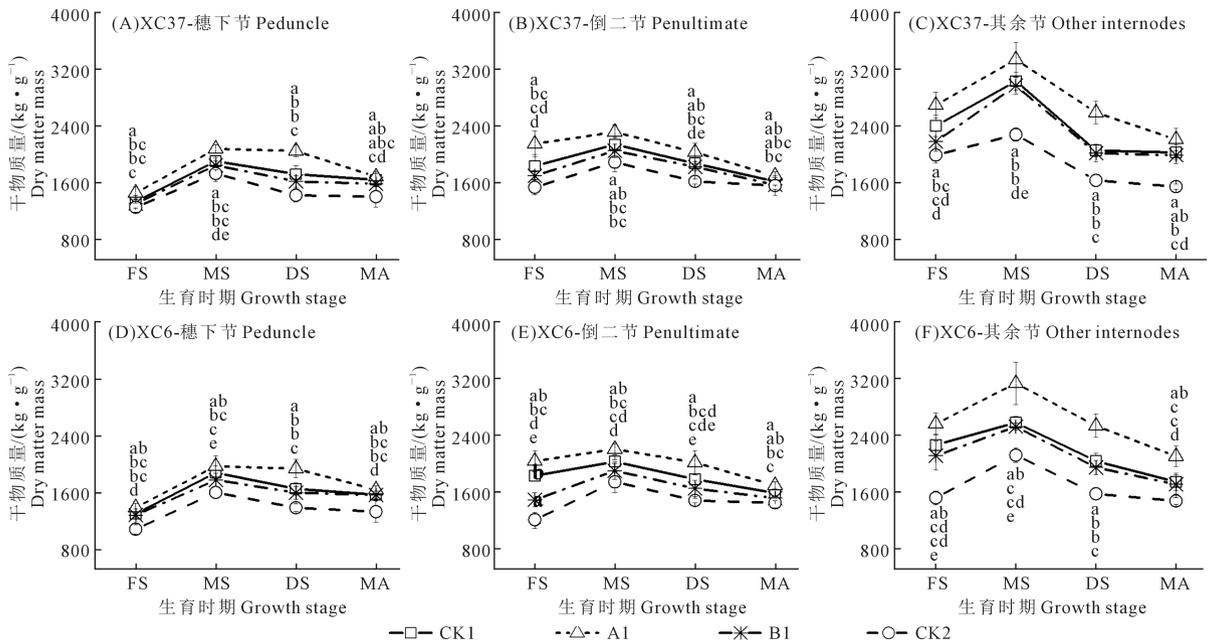


图 6 不同施氮处理对滴灌春小麦不同节位干物质质量的影响

Fig.6 Effects of different nitrogen treatments on dry matter weight at different nodes of spring wheat under drip irrigation

表 3 不同施氮处理对滴灌春小麦产量及其构成因子的影响

Table 3 Effects of different nitrogen treatments on spring wheat yield and yield composition factors under drip irrigation

品种 Variety (V)	处理 Treatment (N)	千粒重/g 1000-grain weight	穗数/(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Spike number	穗数粒 Grain per spike	籽粒产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Grain yield
XC37	CK1	45.67abcd	415.64b	36.63ab	6895.81abc
	A1	47.09a	435.75a	37.39ab	7170.56a
	B1	46.62ab	410.95bc	38.03a	6782.11bc
	CK2	44.67cd	393.95cd	34.49c	5664.87d
XC6	CK1	45.14bcd	410.27bc	36.34b	6648.67c
	A1	46.84a	427.62ab	37.04ab	7053.33ab
	B1	46.21abc	407.15bc	37.69ab	6697.73bc
	CK2	44.24d	382.15d	34.07c	5383.47d
F	V	ns	**	ns	*
	N	**	**	**	**
	N×V	*	*	*	*

注: \*、\*\*、ns 分别表示差异显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )、不显著( $P>0.05$ );同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: \*, \*\*, and ns indicate significant differences ( $P<0.05$ ), extremely significant differences ( $P<0.01$ ) and no significant difference ( $P>0.05$ ), respectively. Different lowercase letters following values within the same row indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same as below.

成因子影响显著 ( $P < 0.05$ )。千粒重、穗数、穗粒数变化趋势一致, XC37 和 XC6 在 A1 及 CK1 处理下产量及其构成因子最大。两品种产量及其构成随施氮量减少呈先增后减的变化, CK2 和 B1 导致产量及其构成因子的降低, CK1 增产效果不明显。与 CK1 相比, XC37 在 A1 处理下千粒重、穗数、穗粒数、产量分别提高 3.12%、4.84%、2.06%、3.98%, XC6 分别提高 3.77%、4.23%、1.93%、6.09%, XC37 比 XC6 分别提高 0.89%、1.81%、0.97%、2.97%。经多项式拟合, 籽粒产量与氮肥施用量呈二次曲线关系:  $y_{21} = -0.0168x^2 + 9.4535x + 5658.6$  (XC37,  $R^2 = 0.9547$ );  $y_{21} = -0.0263x^2 + 12.4420x + 5376.5$  (XC6,  $R^2 = 0.9550$ )。即当两品种小麦施氮量  $x$  为  $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, XC37 的产量为  $6976.82 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; XC6 的产量为  $6839.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

#### 2.4 不同施氮处理下春小麦茎鞘果聚糖、NSC、干物质转运对产量的贡献

就果聚糖转运而言, 品种对小麦倒二节和其余节的花后转运率无显著影响, 施氮量对各节位花前和花后转运率、贡献率均存在极显著影响, 品种及施氮量互作对花前、花后转运率和贡献率均有显著影响(其余节花后转运率、贡献率除外)(表 4)。不同施氮处理下, 两个品种 A1 处理不同节位果聚糖花前转运率均显著低于 CK2 ( $P < 0.05$ ), 果聚糖花后转运率、贡献率及花前贡献率均高于 CK2。果聚糖转运率变化范围为 16.14%~49.38%, 贡献率为 4.60%~35.77%。除 B1 处理, 其余节果聚糖贡献率

高于倒二节。两品种花后果聚糖对籽粒贡献率均高于花前, XC37 花前和花后对籽粒贡献率较 XC6 增幅分别为 44.75%~149.80% 和 15.37%~62.52%。

由表 5 可知, 施氮量对两节位花前、花后 NSC 转运率和贡献率有极显著影响(其余节花后转运率除外), 品种及施氮量互作对两节位 NSC 花前转运率、贡献率及倒二节花后转运率、其余节花后贡献率均有显著影响。不同施氮量下各节位 NSC 花后转运率及花前、花后贡献率均为 A1 处理最大, 均显著高于 CK2; 花前和花后 NSC 贡献率表现为  $A1 > CK1 > B1 > CK2$ , 各处理 NSC 转运率、贡献率分别为 21.43%~44.37%、9.91%~45.65%。不同节位 NSC 转运率、贡献率略有差异, 其余节的 NSC 花后转运率及其对籽粒贡献率高于倒二节。两品种花后 NSC 转运率及其对籽粒贡献率均高于花前, 提高了 55.11%~74.99%; XC37 花前、花后 NSC 对籽粒贡献率比 XC6 分别提高 9.67%~72.83%、30.60%~81.71%。

不同施氮量下茎鞘各节位干物质转运率、贡献率存在差异, 品种、施氮量均对两节位转运量、转运率和贡献率有显著影响, 二者互作对穗下节籽粒贡献率有显著影响(表 6)。茎鞘干物质转运率为 11.14%~33.83%, 对籽粒贡献率为 4.28%~27.44%。A1 处理两品种转运率、贡献率均比 CK2 显著提升 ( $P < 0.05$ )。各处理其余节转运率、贡献率较高, 倒二节次之, 穗下节最低。两品种干物质转运率及对籽粒的贡献率均表现为 XC37 略高于 XC6。

表 4 不同施氮处理对滴灌春小麦各节位花前和花后果聚糖转运率、贡献率的影响/%

Table 4 Effects of different nitrogen treatments on remobilization rate and contribution rate of fructan in penultimate and other internodes of spring wheat during the pre- and post-anthesis under drip irrigation

品种 Variety (V)	处理 Treatment (N)	花前转运率 Remobilization rate of pre-anthesis		花后转运率 Remobilization rate of post-anthesis		花前贡献率 Contribution rate of pre-anthesis		花后贡献率 Contribution rate of post-anthesis	
		倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes
XC37	CK1	37.80b	36.58b	30.37d	31.47a	16.16a	21.03a	18.65c	26.40b
	A1	29.05c	29.41c	34.53a	32.39a	16.73a	21.96a	30.38a	35.77a
	B1	41.48ab	27.41c	32.91ab	31.17a	15.57a	10.78c	18.41c	17.81c
	CK2	40.91ab	49.38a	29.37d	30.75a	9.97b	13.47b	10.14de	12.11d
XC6	CK1	23.65d	21.53d	32.26bc	31.42a	8.03c	8.42d	16.17c	17.92c
	A1	23.28d	19.66de	33.22ab	32.19a	10.66b	11.18c	22.77b	26.99b
	B1	28.00c	16.14e	30.58cd	30.92a	7.64c	4.60e	12.02d	12.76d
	CK2	44.70a	49.22a	32.80ab	29.02b	6.89c	8.97d	7.45e	7.52e
	V	*	*	ns	ns	*	*	*	*
	N	*	*	*	*	*	*	*	*
	N×V	*	*	*	ns	*	*	*	ns

表 5 不同施氮处理对滴灌春小麦各节位花前和花后 NSC 转运率、贡献率的影响/%

Table 5 Effects of different nitrogen treatments on remobilization rate and contribution rate of NSC in penultimate and other internodes of spring wheat during the pre- and post-anthesis under drip irrigation

品种 Variety (V)	处理 Treatment (N)	花前转运率 Remobilization rate of pre-anthesis		花后转运率 Remobilization rate of post-anthesis		花前贡献率 Contribution rate of pre-anthesis		花后贡献率 Contribution rate of post-anthesis	
		倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes
XC37	CK1	26.10c	33.52c	32.48a	34.62a	14.43b	22.15a	26.59b	35.00b
	A1	27.68c	26.01d	32.76a	34.72a	21.57a	22.33a	37.97a	45.65a
	B1	33.32b	27.41d	31.24ab	34.25ab	13.37bc	12.39c	18.23c	23.55c
	CK2	40.54a	37.98b	30.24ab	33.93ab	12.15cd	11.90c	12.99d	16.10d
XC6	CK1	25.69c	26.88d	32.39a	32.68ab	10.78de	12.82bc	20.10c	23.14c
	A1	21.43d	21.55e	31.80ab	33.00ab	13.07bc	14.77b	28.43b	33.75b
	B1	28.80c	29.19d	22.29c	32.47ab	10.08e	10.95c	10.03d	18.03d
	CK2	43.84a	44.37a	29.46b	31.97b	9.91e	10.85c	9.44d	11.50e
F	V	ns	ns	**	**	**	**	**	**
	N	**	**	**	ns	**	**	**	**
	N×V	*	**	**	ns	**	**	ns	*

表 6 不同施氮处理对滴灌春小麦茎鞘干物质转运量、转运率、贡献率的影响

Table 6 Effects of different nitrogen treatments on transfer and contribution rate of dry material in the stem and sheath of spring wheat under drip irrigation

品种 Variety (V)	处理 Treatments (N)	转运量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Transportation amount			转运率/% Transfer rate			对籽粒贡献率/% Contribution rate to grain		
		穗下节 Peduncle internode	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	穗下节 Peduncle internode	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes	穗下节 Peduncle internode	倒二节 Penultimate internode	其余节 Other internodes
XC37	CK1	267.33c	598.75b	1109.27b	15.30bc	24.31ab	33.19a	5.99c	13.41b	24.85a
	A1	394.92a	731.98a	1244.60a	18.96a	26.73a	33.83a	8.71a	16.14a	27.44a
	B1	262.77c	506.60c	893.40c	14.22cd	23.48b	33.04a	5.93c	11.44c	20.18bc
	CK2	228.88d	316.87d	613.63e	13.22de	17.57de	32.26ab	5.21d	7.21d	13.97d
XC6	CK1	265.53c	480.80c	922.67c	15.78bc	21.81bc	32.36ab	6.20c	11.22c	21.54b
	A1	334.75b	589.20b	1133.77ab	16.93b	23.11bc	32.76a	7.62b	13.42b	25.81a
	B1	215.48d	369.90d	740.40d	12.10ef	20.32cd	32.14ab	5.07d	8.71d	17.43c
	CK2	178.85e	227.48e	519.88e	11.14f	16.88e	30.48b	4.28e	5.45e	12.45d
F	V	**	**	**	**	**	*	**	**	**
	N	**	**	**	**	**	*	**	**	**
	N×V	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns

### 3 讨论

#### 3.1 施氮量对滴灌春小麦茎鞘中果聚糖代谢酶活性、果聚糖含量及其积累与转运的影响

果聚糖主要储存在小麦茎鞘中,是 NSC 的主要成分<sup>[9]</sup>,其代谢受 SST 和 FEH 两种关键酶调控,SST 与果聚糖的合成密切相关,而 FEH 则与果聚糖的降解有关<sup>[10-11]</sup>。姜东等<sup>[11]</sup>认为,在开花后约 15~20 d (乳熟期),小麦茎鞘中的果聚糖含量达最大,SST 活性也相对较高,开花后 25~30 d 左右(蜡熟期)SST 活性最高。本研究与其结论较为一致,随生育进程推进,小麦茎鞘 SST 活性于乳熟期达到最大,成熟期最小,而 FEH 活性在蜡熟期达到最大,成熟期最小;说明生育前期小麦茎鞘 SST 活性较高,促进茎鞘果

聚糖积累,而生育前后期 FEH 活性相对较高,有利于茎鞘中果聚糖的分解及其向籽粒的运转。本研究进一步发现,在 A1 处理(施氮量 255 kg·hm<sup>-2</sup>)下,乳熟期其余节果聚糖含量最高,其积累量比倒二节高 8.77%,茎鞘中果聚糖花后转运率以及对籽粒的贡献率分别比花前提高 36.93%、102.15%,而赵万春等<sup>[22]</sup>发现,施氮量为 200 kg·hm<sup>-2</sup>时,小麦茎鞘的果聚糖含量在成熟期时相对较高,但较其他时期提升不显著。研究结果差异可能是试验环境不同所致。本研究中,乳熟期‘新春 37 号’(XC37)其余节果聚糖含量比‘新春 6 号’(XC6)高 17.01%,且 XC37 其余节果聚糖花前、花后转运率及两者对籽粒的贡献率均高于 XC6,分别增加 47.41%、1.89%、107.67%、45.12%,表明强筋型小麦(XC37)更有利

于茎鞘中贮藏物质向籽粒转运,促进籽粒灌浆。施氮量与品种互作对滴灌春小麦果聚糖花前转运率以及其对籽粒的贡献率具有显著影响。总之,适宜的氮肥供给主要通过增强小麦茎鞘中 FEH 和 SST 活性促进其储存的果聚糖向籽粒转运。

### 3.2 施氮量对滴灌春小麦茎鞘中 NSC 含量及其积累与转运的影响

促进小麦茎鞘中 NSC 向籽粒转运,可有效提高粒重和产量<sup>[23]</sup>。本研究发现 A1 处理有利于茎鞘中 NSC 积累,而 CK2 和 B1 处理 NSC 积累较缓,这与 Li 等<sup>[24]</sup>的研究结论一致。说明合理施氮有利于植株茎鞘中 NSC 积累,施氮过多或过少将导致其积累受抑,不利于产量形成。当施氮量为  $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,各茎节 NSC 含量及其对籽粒的贡献率最大,其中,乳熟期其余节 NSC 含量较倒二节提高 13.91%,其余节 NSC 花前、花后对籽粒的贡献率较倒二节分别提高 8.27% 和 19.47%。本研究还发现,在不同施氮量下,两个品种各节位花前 NSC 对籽粒的贡献率为 9.91% ~ 22.33%,花后 NSC 贡献率达到 9.44% ~ 45.65%,基本表现为花后 NSC 对产量的贡献率较大。这与马尚宇等<sup>[5]</sup>研究结果略有不同,其研究发现小麦茎鞘中 NSC 花前转运率对产量的贡献率较大,规律不同可能是各研究的施肥和灌溉方式不同所致<sup>[25]</sup>。本研究还表明,在 A1 处理下,乳熟期 XC37 其余节 NSC 含量比 XC6 增加 14.23%,花前和花后转运率分别提高 20.70% 和 5.21%,花前和花后对籽粒的贡献率分别提高 51.18% 和 35.26%。施氮量与品种之间存在显著的互作效应,说明适宜的施氮量有利于提高强筋型小麦 XC37 茎鞘 NSC 花前转运率以及对籽粒的贡献率,提高产量。但在滴灌条件下,水氮互作对不同基因型春小麦茎鞘 NSC 积累转运调控产量形成的规律还有待进一步研究。

### 3.3 施氮量对滴灌春小麦茎鞘干物质质量和产量的影响

茎鞘是小麦花前贮存物质的主要营养器官,一般其贮藏物质转运对小麦产量的贡献率为 10% ~ 20%<sup>[26]</sup>。研究表明,适当增施氮肥可促进小麦茎鞘干物质积累与转运<sup>[27]</sup>,施氮量过多则会抑制茎鞘干物质转运并降低其对籽粒的贡献率<sup>[28]</sup>;在施氮量  $0 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  范围内增施氮肥,黄淮海麦区小麦花后茎鞘干物质积累及其对籽粒产量的贡献率呈先升后降的趋势,并在施氮量  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时达到最大<sup>[29]</sup>。本试验中,施氮量为  $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时成熟期各节位茎鞘干物质对籽粒的贡献率最大,其中其余节对产量的贡献率为 26.63%,倒二节为 14.78%,

穗下节为 8.17%。牛巧龙等<sup>[30]</sup>研究发现,施氮量为  $0 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,强筋小麦和弱筋小麦茎鞘干物质转运率分别为 51.1% ~ 56.4%、35.2% ~ 48.3%,对籽粒贡献率分别为 32.6% ~ 44.6%、15.9% ~ 29.3%,强筋小麦茎鞘干物质转运及其对籽粒的贡献率高于弱筋小麦;这与本试验研究结果一致,即 A1 处理下成熟期 XC37(强筋型)茎鞘干物质转运及其对产量贡献率均高于 XC6(中筋型),两个品种茎鞘干物质转运率分别为 18.96% ~ 33.83%、16.93% ~ 32.76%,对产量贡献率分别为 8.71% ~ 27.44%、7.62% ~ 25.81%,XC37 干物质转运量、转运率以及对籽粒的贡献率分别比 XC6 高 9.78%、3.27%、6.32%,说明氮素对小麦干物质转运量及其对籽粒贡献的影响因品种不同而存在差异<sup>[31-33]</sup>。

## 4 结 论

不同施氮条件下,两个春小麦品种各节位茎鞘 SST 活性、果聚糖含量、NSC 含量以及茎鞘干物质质量随生育期推进均呈先增后降的变化规律,而 FEH 活性则表现为先降后增再降。不同节位中,其余节各指标高于穗下节、倒二节。与对照(施氮量  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )相比,A1 处理(施氮量  $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )显著提高了其余节茎鞘果聚糖含量、果聚糖代谢酶活性、NSC 含量以及茎鞘干物质质量,有利于促进茎鞘果聚糖、NSC 以及干物质向籽粒转运,对产量的贡献率分别达到 23.98%、29.13%、29.96%;XC37 各指标以及产量的提升幅度高于 XC6。因此, $255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  可作为新疆滴灌春小麦(特别是强筋春小麦)较为适宜的氮肥施用水平进行推广应用。

### 参 考 文 献:

- [1] 杨建昌, 张建华. 促进稻麦同化物转运和籽粒灌浆的途径与机制[J]. 科学通报, 2018, 63(28): 2932-2943.  
YANG J C, ZHANG J H. Approach and mechanism in enhancing the remobilization of assimilates and grain-filling in rice and wheat[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(28): 2932-2943.
- [2] 王彬, 张英华, 邓万云, 等. 小麦茎鞘非结构性碳水化合物代谢与调控研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(22): 87-94.  
WANG B, ZHANG Y H, DENG W Y, et al. Review on metabolism and regulation of non-structural carbohydrates in wheat stem[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(22): 87-94.
- [3] 姜东, 于振文, 李永庚, 等. 高产小麦营养器官临时贮存物质积运及其对粒重的贡献[J]. 作物学报, 2003, 29(1): 31-36.  
JIANG D, YU Z W, LI Y G, et al. Accumulation and redistribution of temporal reserves in vegetative organs and its contribution to grain weight in high yield winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(1): 31-36.
- [4] 杨建昌, 苏宝林, 王志琴, 等. 亚种间杂交稻籽粒灌浆特性及其生理的研究[J]. 中国农业科学, 1998, 31(1): 7-14.  
YANG J C, SU B L, WANG Z Q, et al. Characteristics and physiology

- of grain-filling in intersubspecific hybrid rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(1): 7-14.
- [5] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 375-385.  
MA S Y, WANG Y Y, LIU Y N, et al. Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture (Chinese and English)*, 2020, 28(3): 375-385.
- [6] 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.  
PAN J F, WANG B, CUI K H, et al. Effects of nitrogen application on accumulation and translocation of nonstructural carbohydrates in internodes and sheaths of rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2016, 30(3): 273-282.
- [7] 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.
- [8] RIBEIRO M, FERREIRA D, SIOPA J, et al. Natural variation in the content and degree of polymerization of fructans in wheat: potential for selection of genotypes with beneficial health composition[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(35): 10929-10939.
- [9] WINZELER M, DUBOIS D, NÖSBERGER J. Absence of fructan degradation during fructan accumulation in wheat stems [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1990, 136(3): 324-329.
- [10] 孟维伟, 褚鹏飞, 于振文, 等. 灌水对不同品种小麦茎和叶鞘糖含量及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2487-2494.  
MENG W W, CHU P F, YU Z W, et al. Effects of irrigation on the water soluble carbohydrate contents in different wheat cultivars stem and sheath and the grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2487-2494.
- [11] 姜东, 于振文, 李永庚, 等. 高产冬小麦茎中果聚糖代谢及氮素水平的调控[J]. *作物学报*, 2002, 28(1): 79-85.  
JIANG D, YU Z W, LI Y G, et al. Study on fructans metabolism in stems of high-yielding winter wheat and effects of nitrogen levels applied on fructans metabolism[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 79-85.
- [12] VEENSTRA L D, SANTANTONIO N, JANNINK J L, et al. Influence of genotype and environment on wheat grain fructan content [J]. *Crop Science*, 2019, 59(1): 190-198.
- [13] KHAMWAN S, BOONLUE S, MONGKOLTHANARUK W. Production of fructan synthesis/hydrolysis of endophytic bacteria involved in inulin production in Jerusalem artichoke[J]. *3 Biotech*, 2022, 12(11): 296.
- [14] GUO Q Q, TURNBULL M H, SONG J C, et al. Depletion of carbohydrate reserves limits nitrate uptake during early regrowth in *Lolium perenne* L. [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2017, 68(7): 1569-1583.
- [15] 张金汕, 贾永红, 孙鹏, 等. 匀播和施氮量对冬小麦群体、光合及干物质积累的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(7): 12-24.  
ZHANG J S, JIA Y H, SUN P, et al. Effect of uniform pattern and N application rate on colony, photosynthesis and dry matter accumulation of winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 12-24.
- [16] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 等. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 76-86.  
CHUAN L M, HE P, ZHAO T K, et al. Nitrogen cycling and balance for wheat in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 76-86.
- [17] 郭新正, 吐尔逊娜依·米吉提. 新疆土壤中的氮素与化学氮肥的施用[C]//氮素循环与农业和环境学术研讨会论文(摘要)集, 厦门: 中国土壤学会, 2001: 30-31.  
GUO X Z, MIJITI T E X N Y. Nitrogen in soil and application of chemical nitrogen fertilizer in Xinjiang[C]//Symposium on Nitrogen Cycle and Agriculture and Environment (Abstract) Collection, Xiamen; Soil Science Society of China, 2001: 30-31
- [18] VERSPREET J, CIMINI S, VERGAUWEN R, et al. Fructan metabolism in developing wheat (*Triticum aestivum* L.) kernels[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2013, 54(12): 2047-2057.
- [19] 姜东, 陶勤南, 曹卫星. 渍水对小麦节间水溶性碳水化合物积累与再分配的影响[J]. *作物学报*, 2002, 28(2): 230-234.  
JIANG D, TAO Q N, CAO W X. Effects of waterlogging on accumulation and redistribution of water soluble carbohydrate metabolism in culm of wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 230-234.
- [20] 马召朋, 栗孟飞, 杨德龙, 等. 不同水分条件下冬小麦灌浆期茎叶可溶性碳水化合物积累转运与籽粒灌浆的关系[J]. *草业学报*, 2014, 23(4): 68-78.  
MA Z P, LI M F, YANG D L, et al. Relationship between grain filling and accumulation and remobilization of water soluble carbohydrates in leaf and stem of winter wheat during the grain filling in different water conditions[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(4): 68-78.
- [21] 王茂莹, 贺明荣, 李玉, 等. 施氮量对不同小麦品种产量及氮素吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 241-248.  
WANG M Y, HE M R, LI Y, et al. Effects of nitrogen application rate on yield and nitrogen uptake and utilization of different wheat varieties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 241-248.
- [22] 赵万春, 董剑, 高翔, 等. 氮肥对杂交小麦果聚糖积累与转运及其杂种优势的影响[J]. *作物学报*, 2006, 32(4): 607-612.  
ZHAO W C, DONG J, GAO X, et al. Effects of nitrogen fertilizer on fructan accumulation, translocation and their heterosis in hybrid wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4): 607-612.
- [23] 张伟杨, 任维晨, 于吉祥, 等. 轻干湿交替灌溉促进水稻茎中碳同化物积累与转运的机制[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 42(6): 9-16.  
ZHANG W Y, REN W C, YU J X, et al. The mechanism underlying alternate wetting and moderate soil drying irrigation enhancing carbon assimilates accumulation and remobilization of rice stems[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2021, 42(6): 9-16.
- [24] LI G H, CHEN X, ZHOU C Y, et al. Vascular bundle characteristics of different rice variety treated with nitrogen fertilizers and its relation to stem assimilates allocation and grain yield[J]. *Agriculture*, 2022, 12(6): 779.
- [25] MYERS J A, KITAJIMA K. Carbohydrate storage enhances seedling shade and stress tolerance in a neotropical forest[J]. *Journal of Ecology*, 2007, 95(2): 383-395.
- [26] 魏爱丽, 王志敏, 李战友. 高产小麦茎鞘贮藏物质利用率及其对穗贡献的基因型差异研究[J]. *华北农学报*, 2002, 17(2): 23-29.  
WEI A L, WANG Z M, LI Z Y. Study on utilization efficiency of stem reserves and its contribution to ear in different genotype wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(2): 23-29.