

# 药隔期低温胁迫对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响

柯媛媛<sup>1,2</sup>, 陈翔<sup>1</sup>, 张乐乐<sup>1</sup>, 张妍<sup>1</sup>, 许辉<sup>1</sup>, Muhammad Ahmad Hassan<sup>1</sup>,  
江港<sup>1</sup>, 林非非<sup>1</sup>, 魏凤珍<sup>1</sup>, 李金才<sup>1,2\*</sup>

(1. 安徽农业大学农学院, 农业农村部华东地区作物栽培科学观测站, 合肥 230036; 2. 江苏省现代作物生产协同创新中心, 南京 210095)

**摘要:** 为探明药隔期低温胁迫对小麦产量的影响, 以烟农 19、新麦 26 为供试材料, 在小麦药隔期进行不同程度 (T1: 2°C/4h、T2: 0°C/4h、T3: -2°C/4h) 的低温处理, 研究药隔期低温胁迫对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响。结果表明: 药隔期低温胁迫显著降低小麦干物质积累量, 不同抗倒春寒性小麦品种间干物质积累量存在差异, 抗倒春寒性弱的小麦品种降幅更大。其中烟农 19 的 T1、T2、T3 处理分别降低 33.4%、46.2% 和 54.7%, 而新麦 26 则分别降低了 50.1%、59.3% 和 72.4%。不同处理小麦籽粒、穗轴+颖壳、茎鞘+叶的干物质积累量均低于 CK, 且随着低温胁迫程度的加重呈明显降低趋势。小麦花前干物质的转运量、转运效率以及花前贮藏干物质对籽粒的贡献率均随着低温胁迫程度加重呈降低趋势。同时低温胁迫显著降低小麦籽粒和穗轴+颖壳的干物质分配比例, 增加茎鞘+叶的分配比例。T1、T2 和 T3 处理显著降低了小麦的穗粒数和千粒重及籽粒产量, 烟农 19 的 T1、T2 和 T3 处理分别减产 56.06%、86.36% 和 98.10%; 新麦 26 的 T1、T2 和 T3 处理分别减产 96.15%、98.07% 和 98.46%。药隔期低温胁迫显著降低小麦干物质的积累量、花前干物质的转运量、转运效率以及花前贮藏干物质对籽粒的贡献率和籽粒干物质分配比例, 严重减少光合同化物向穗部的转运和分配, 影响穗部小花的正常发育, 从而导致穗粒数的减少, 这是造成小麦减产的主要原因。

**关键词:** 小麦; 药隔期; 低温胁迫; 干物质; 产量

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)05-0701-06

## Effects of low temperature stress at anther connective stage on dry matter accumulation, translocation and distribution and grain yield of wheat

KE Yuanyuan<sup>1,2</sup>, CHEN Xiang<sup>1</sup>, ZHANG Lele<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, XU Hui<sup>1</sup>, Muhammad Ahmad Hassan<sup>1</sup>,  
JIANG Gang<sup>1</sup>, LIN Feifei<sup>1</sup>, WEI Fengzhen<sup>1</sup>, LI Jincan<sup>1,2</sup>

(1. School of Agronomy, Anhui Agricultural University, East China Crop Cultivation Scientific Observation Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei 230036; 2. Collaborative Innovation Center of Modern Crop Production in Jiangsu Province, Nanjing 210095)

**Abstract:** To quantify the impact of low-temperature stress on winter wheat productivity, two wheat cultivars Yannong-19 (YN-19, tolerant to cold stress) and Xinmai-26 (XM-26, sensitive to cold stress) at anther connective phase, were subjected to different temperature levels (T1: 2 °C/4 h, T2: 0 °C/4 h, T3: -2 °C/4 h) with a constant duration of 4 hours in a controlled chamber. During the experiment, dry matter translocation, distribution, and accumulation were recorded and analyzed with respect to final grain yield. Analysis results undoubtedly illustrated that wheat exposure to cold stress at the critical anther connective stage cause a severe reduction in dry matter accumulation, consequently decreased the final wheat yield. A significant difference in dry matter accumulation has been observed within two cultivars as one is prone and the other tolerant to cold stress. As results of T1, T2 and T3, YN-19 showed 33.4%, 46.2%, and 54.7% reduction in dry matter, while in XM-26 it declined by 50.1%, 59.3%, and 72.4%, respectively. Additionally, dry matter accumulation and distribution substantially reduced under cold stress. Thus, dry matter proportion in grains, rachis + glume, stem sheath, and leaves decreased significantly in all treatments compared to control (CK). Similarly, agronomic traits like the number of grains per spike, 1000-grain weight, and final

收稿日期: 2020-12-08

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2017YFD0300408)和安徽省自然科学基金(2008085QC122)共同资助。

作者简介: 柯媛媛, 硕士研究生。E-mail: keyuanyuan916@163.com

\* 通信作者: 李金才, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: ljcs122423@126.com

grain yield were also drastically reduced in YN-19 by 56.06% (T1), 86.36% (T2), 98.10% (T3); and of XM-26 by 96.15% (T1), 98.07% (T2), 98.46% (T3), respectively. Low temperature stress in wheat at anther connective stage cause significant reduction in dry matter accumulation. Prior to anthesis, it severely disrupts the transport efficiency which results in uneven distribution of grain dry matter content. Moreover, cold stress affects the normal floret development by restricting photosynthates distribution in spikes, subsequently followed by shorter, pinched and reduced number of grains per spike. It recognized as primary causes of substantial yield losses.

**Key words:** wheat; anther connective stage; low temperature stress; dry matter; grain yield

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是世界三大粮食作物之一, 全球约 60% 的人口以小麦为主食<sup>[1]</sup>。近年来, “温室效应”不断加剧, 全球气候变暖导致极端低温气候事件发生的频率、强度和持续时间不断增加, 同时加速了小麦的生育进程<sup>[2]</sup>, 导致其低温敏感期提前<sup>[3]</sup>, 从而在春季低温 (倒春寒) 来临时更加脆弱。据报道, 低温对澳大利亚、欧洲和中国等国家的小麦生产造成严重影响<sup>[4-6]</sup>。其中, 美国堪萨斯州在 1995—2010 年间低温霜冻事件发生多达 41 次<sup>[5]</sup>。我国黄淮海区倒春寒发生的程度和次数也愈加严重和频繁, 在河北省南部、河南省西部和山东省中部等地区的发生频率可达 30% 以上, 其中山东中部泰山地区一带的发生频率甚至高达 70%<sup>[7]</sup>。因此, 倒春寒已成为限制小麦生产的主要农业气象灾害之一, 同时也是影响黄淮海区小麦丰产稳产优质的主要因素。

小麦倒春寒 (late spring coldness in wheat, LSCW) 一般发生在 3 月中下旬到 4 月上旬, 此时小麦幼穗正处于雌雄蕊原基分化期至药隔期, 极易受倒春寒伤害<sup>[8]</sup>, 突然遭遇降温天气会严重影响幼穗发育, 导致结实率下降, 受灾小麦一般减产 10%~30%, 重者减产达 50% 以上<sup>[9-10]</sup>。小麦产量的高低主要取决于其光合物质的生产、积累与运转<sup>[11]</sup>, 籽粒灌浆物质约 1/3 来源于开花前营养器官中贮藏同化物的转运; 2/3 来自花后光合产物的积累。前者主要用于构建穗器官, 后者是小麦籽粒形成的主要来源<sup>[12]</sup>。

低温胁迫会通过降低光系统 II 的活性来降低小麦功能叶的净光合速率<sup>[13]</sup>, 减少光合物质的生产, 导致干物质积累量减少<sup>[14]</sup>。低温还会影响干物质在小麦各个器官中的分配比例。研究发现, 低温胁迫后小麦花前茎分配指数随温度降低而降低, 花后茎分配指数随温度降低而升高, 穗分配比例降低<sup>[15]</sup>, 表明低温胁迫会使光合产物向穗部器官的运输受阻。因此, 低温胁迫主要是通过降低叶片的光合生产能力以及干物质的积累转运来降低小麦产量。但是, 前人研究大多集中于苗期低温冷害或冻害对小麦干物质积累转运的影响, 而对于小麦倒春寒敏感期的药隔期低温胁迫对小麦干物质积累、转运与分

配及产量的影响鲜有报道。同时, 为更加科学地模拟大田倒春寒灾害的自然温度变化规律, 本研究于凌晨 1:00—5:00 进行低温胁迫处理, 旨在为小麦生产的防灾减灾提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 试验地概况** 试验于 2019 年 10 至 2020 年 6 月在安徽农业大学农萃园基地 (31.83°N, 117.24°E, 海拔 21.3 m) 进行, 该地区属于北亚热带湿润季风气候, 多年平均气温 15℃ 左右, 降水量为 850~900 mm, 日照时数 2 000~2 200 h, 无霜期 220~240 d。前茬作物为玉米, 土壤类型为黄棕壤土, 0~20 cm 耕层土壤 pH 为 6.5, 有机质 16.3 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 1.3 g·kg<sup>-1</sup>、速效氮 112.2 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 23.0 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 161.6 mg·kg<sup>-1</sup>。

**1.1.2 试验设计** 在前期研究的基础上<sup>[16]</sup>, 以抗倒春寒性强的小麦品种烟农 19 (YN19) 和抗倒春寒性弱的小麦品种新麦 26 (XM26) 为供试品种。2019 年 11 月 1 日播种, 将大田 0~20 cm 耕作层土壤装入盆栽桶 (PVC 桶, 高 35 cm、直径 26 cm, 5 个排水孔), 每盆装土 8 kg, 每盆施复混肥 4.32 g (N:P:K=15:15:15), 埋于试验田中。三叶期每盆定苗 7 株, 拔节期每盆追施尿素 1.41 g。通过叶龄余数诊断法 (倒二叶出生)、伸长节间诊断法 (第 3 节间开始伸长) 结合镜检观察, 在药隔期选取长势一致的植株搬入超低温人工气候培养箱 (DGXM-1008 型, 宁波江南仪器厂), 设置 2℃、0℃、-2℃ 的低温, 于凌晨 1:00—5:00 进行低温处理 (培养箱内相对湿度设置为 75%), 以搬入 15℃ 培养箱的小麦为对照 (CK), 箱内温度变化幅度在 (±0.5)℃。处理结束后将小麦移出培养箱, 搬至大田生长直至成熟收获。其它田间管理措施同一般高产田相同。

### 1.2 方法

**1.2.1 取样** 于小麦开花期、成熟期分别进行取样, 选取 3 个具有代表性、长势均匀一致的单茎。开花期将植株分为穗部、茎秆+叶鞘、叶片 3 个部分, 成熟期分为籽粒、穗轴+颖壳、茎秆+叶鞘、叶片 4

个部分。105 °C 下杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重后称量, 测各部分干物质重量。

**1.2.2 干物质的积累、转运和分配** 可通过以下公式计算<sup>[17]</sup>:

(1) 花前营养器官干物质转运量 ( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ )(DMT)=开花期营养器官干物重 - 成熟期营养器官干物重

(2) 花前营养器官干物质转运率(%)(PDMT)=(花前营养器官干物质转运量/开花期营养器官干物重) $\times 100\%$

(3) 花前营养器官干物质转运对籽粒干重的贡献率(%)(CDMT)=(花前营养器官干物质转运量/成熟期籽粒干重) $\times 100\%$

(4) 花后干物质积累量对籽粒干重的贡献率(%)(CDMAA)=(花后干物质积累量/成熟期籽粒干重) $\times 100\%$

**1.2.3 产量及产量构成因子** 在小麦成熟期, 每个处理从 2 盆中选取具有代表性的 3 株小麦, 调查单株穗数、穗粒数、穗粒质量, 按单株记产。

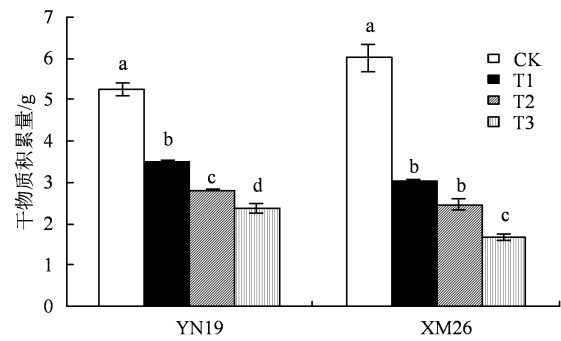
**1.2.4 数据分析与处理** 用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理和图表制作, 用 SPSS19.0 软件进行数据的显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 药隔期低温胁迫对小麦干物质积累量的影响

由图 1 可见, 药隔期低温胁迫显著降低小麦干物质积累量, 不同抗倒春寒性小麦品种间干物质积累量存在差异, 抗倒春寒性弱的小麦品种降幅更大。其中 YN19 的 T1、T2、T3 处理分别降低 33.4%、46.2%和 54.7%, 而 XM26 则分别降低了 50.1%、59.3%和 72.4%。随着小麦生育进程的推进, YN19 和 XM26 地上部干物质积累量呈上升趋势。与 CK 相比, 两品种成熟期干物质积累量随着低温胁迫程

度的加重 ( $2^{\circ}\text{C}\rightarrow -2^{\circ}\text{C}$ ) 呈显著降低趋势。



同一品种数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

图 1 药隔期低温胁迫对成熟期小麦干物质积累量的影响  
Figure 1 Impacts of low temperature stress at anther connective stage on dry matter accumulation of mature wheat

### 2.2 药隔期低温胁迫对小麦不同器官干物质积累与分配的影响

由图 2 可见, 随着药隔期低温胁迫程度加重, 小麦籽粒积累量呈显著降低趋势, 且抗倒春寒性弱的小麦品种降幅更大。YN19 的籽粒积累量分别显著降低 48.3%、67.2%和 80.0%, XM26 分别显著降低 89.7%、96.9%和 97.9%。小麦的穗轴+颖壳、茎鞘+叶的干物质积累量也随着温度的降低而降低, 其中 YN19 的 T3 处理分别降低了 53.8%和 12.4%, XM26 的 T3 处理分别降低 53.2%和 39.3%。

药隔期低温胁迫显著降低籽粒干物质分配比例, 随着处理温度的降低呈显著降低趋势 (图 3)。YN19 的 T1、T2 和 T3 处理分别降低 22.1%、39.1%和 55.8%, XM26 的 T1、T2 和 T3 处理分别降低 75.5%、92.2%和 92.3%。但茎鞘+叶片干物质分配比例随着温度的降低反而增加, YN19 的 T1、T2、T3 处理分别增加 58.2%、87.7%和 120.7%, XM26 的 T1、T2 和 T3 处理分别增加 81.3%、106.5%和 117.4%。

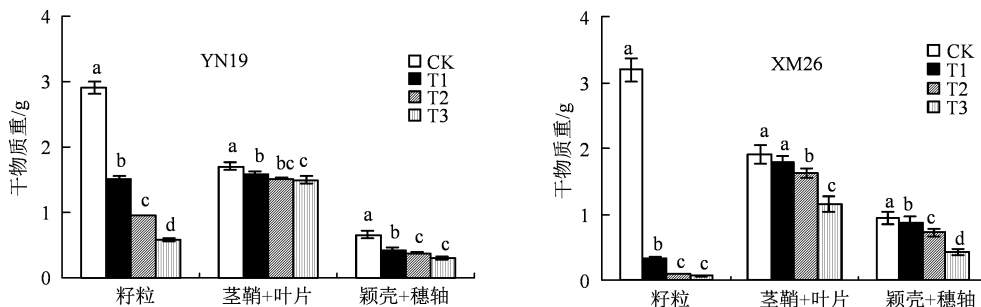


图 2 药隔期低温胁迫对成熟期 YN19 和 XM26 不同器官干物质积累的影响

Figure 2 Impacts of low temperature stress at anther connective stage on dry matter accumulation in different organs of YN19 and XM26 at maturity

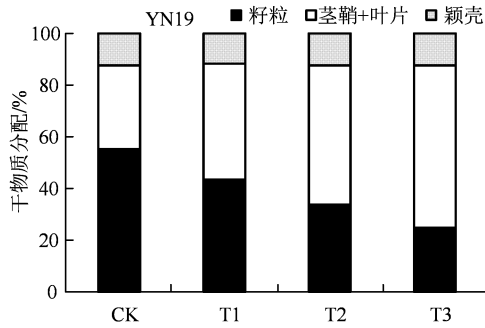
可见, 药隔期低温胁迫明显降低小麦籽粒、穗轴+颖壳、茎鞘+叶的干物质积累量, 降低籽粒

及穗轴+颖壳的干物质分配比例, 且均随着温度的降低而降低。同时低温胁迫增加茎鞘+叶的分配比

例,且随着温度的降低而增加。

### 2.3 药隔期低温胁迫对小麦营养器官干物质再分配的影响

由表 1 可见,随着药隔期低温胁迫程度加重,DMT 呈显著降低趋势,且抗倒春寒性弱的小麦品种降幅更大。其中,与 CK 相比,YN19 的 T1、T2、T3 处理分别降低 58.6%、75.8%和 87.9%,



XM26 的 T1、T2、T3 处理分别降低 90.6%、98.1%和 98.3%。小麦的 PDMT、DMAA 也随着温度的降低而降低,其中 YN19 的 T3 处理分别降低了 83.9%和 77.7%,XM26 的 T3 处理分别降低 97.2%和 97.4%。但小麦 CDMAA 随温度的降低反而增加,YN19 分别增加 5.0%、6.5%和 10.8%,XM26 分别增加 2.9%、6.3%和 8.0%。

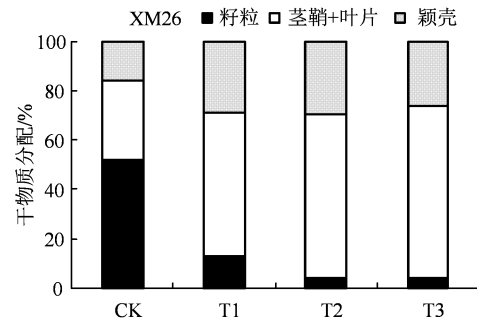


图 3 药隔期低温胁迫对成熟期 YN19 和 XM26 不同器官干物质分配的影响

Figure 3 Impacts of low temperature stress at anther connective stage on dry matter distribution in different organs of YN19 and XM26 at maturity

表 1 药隔期低温胁迫对小麦干物质再分配的影响

Table 1 Effects of low temperature stress at anther connective stage on assimilate redistribution of wheat

品种	处理	花前干物质			花后干物质	
		转运量 /g	转运效率%	贡献率%	积累量/g	贡献率%
		DMT	PDMT	CDMT	DMAA	CMDAA
YN19	CK	0.58 <sup>a</sup>	25.4 <sup>a</sup>	19.8 <sup>a</sup>	2.33 <sup>a</sup>	80.2 <sup>c</sup>
	T1	0.24 <sup>b</sup>	13.1 <sup>b</sup>	15.8 <sup>b</sup>	1.26 <sup>b</sup>	84.2 <sup>b</sup>
	T2	0.14 <sup>c</sup>	8.4 <sup>c</sup>	14.6 <sup>b</sup>	0.81 <sup>c</sup>	85.4 <sup>b</sup>
	T3	0.07 <sup>d</sup>	4.1 <sup>d</sup>	11.1 <sup>c</sup>	0.52 <sup>d</sup>	88.9 <sup>a</sup>
XM26	CK	0.53 <sup>a</sup>	21.7 <sup>a</sup>	16.5 <sup>a</sup>	2.68 <sup>a</sup>	83.5 <sup>c</sup>
	T1	0.05 <sup>b</sup>	2.5 <sup>b</sup>	14.1 <sup>ab</sup>	0.28 <sup>b</sup>	85.9 <sup>bc</sup>
	T2	0.01 <sup>c</sup>	0.7 <sup>c</sup>	11.2 <sup>bc</sup>	0.09 <sup>c</sup>	88.8 <sup>ab</sup>
	T3	0.01 <sup>c</sup>	0.6 <sup>c</sup>	9.8 <sup>c</sup>	0.07 <sup>c</sup>	90.2 <sup>a</sup>

注: 同列数据不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

表 2 药隔期低温胁迫对小麦产量及产量构成因素的影响

Table 2 Effects of low temperature stress at anther connective stage on wheat yield and yield components

品种	处理	单株穗数/个	穗粒数/个	千粒重/g	单穗产量/g
YN19	CK	4.00 <sup>a</sup>	54.21 <sup>a</sup>	48.72 <sup>a</sup>	2.64 <sup>a</sup>
	T1	4.00 <sup>a</sup>	25.62 <sup>b</sup>	45.25 <sup>b</sup>	1.16 <sup>b</sup>
	T2	3.67 <sup>a</sup>	8.09 <sup>c</sup>	44.78 <sup>b</sup>	0.36 <sup>c</sup>
	T3	3.67 <sup>a</sup>	1.06 <sup>d</sup>	44.64 <sup>b</sup>	0.05 <sup>d</sup>
XM26	CK	4.00 <sup>a</sup>	51.78 <sup>a</sup>	50.19 <sup>a</sup>	2.60 <sup>a</sup>
	T1	3.67 <sup>a</sup>	2.19 <sup>b</sup>	45.19 <sup>b</sup>	0.10 <sup>b</sup>
	T2	3.67 <sup>a</sup>	1.08 <sup>b</sup>	42.54 <sup>b</sup>	0.05 <sup>b</sup>
	T3	3.33 <sup>a</sup>	0.88 <sup>b</sup>	42.52 <sup>b</sup>	0.04 <sup>b</sup>

由此可见,药隔期低温胁迫会降低小麦花前干物质的转运量、转运效率以及花前贮藏干物质对籽粒的贡献率,降低花后干物质的同化量。

### 2.4 药隔期低温胁迫对小麦产量及产量构成因素的影响

由表 2 可见,药隔期低温胁迫显著降低小麦籽

粒产量,且随着温度的降低而降低,抗倒春寒性弱的小麦品种降幅更大。在 T1、T2、T3 处理下,YN19 单穗产量分别降低 56.06%、86.36%和 98.10%,XM26 分别降低 96.15%、98.07%和 98.46%。

低温胁迫对小麦的穗数影响不大,却显著降低小麦穗粒数。其中,YN19 的 T1、T2、T3 处理分

别减少 52.74%、85.08%和 98.04%,XM26 分别减少 95.77%、97.91%和 98.30%。YN19 的千粒重分别下降 7.12%、8.09%和 8.37%,XM26 分别下降 9.96%、15.24%和 15.28%。因此,药隔期低温胁迫对小麦产量构成因素的影响为穗粒数>粒重>穗数。

表 3 药隔期低温胁迫穗粒数与各指标的相关性

Table 3 Correlation of grain number per spike and indices under low temperature stress at anther connective stage

指标	干物质重	花前干物质 转运量	花前干物质 贡献率	花后干物质 积累量	花后干物质 贡献率	籽粒 分配比例	茎鞘+叶 分配比例
穗粒数	0.942**	0.991**	0.979**	0.976**	-0.810**	0.897**	-0.951**

注:\*表示 0.05 显著水平; \*\*表示 0.01 极显著水平。

## 2.5 小麦穗粒数与干物质积累转运及分配指标的相关性

对 2 个小麦品种结实粒数与干物质积累转运及分配指标进行相关性分析,结果见表 3。药隔期低温胁迫后,穗粒数与干物质重、DMT、CDMT、DMAA 和籽粒分配比例呈极显著正相关,与 CDMAA 和茎鞘+叶分配比例呈极显著负相关。

## 3 讨论

### 3.1 药隔期低温胁迫对不同抗寒性品种小麦积累转运及分配的影响

“源”、“库”是产量形成的两个方面,产量高低既依赖于“库”的容量,又取决于“源”的生产和光合产物的运输能力<sup>[18]</sup>。低温会抑制作为“源”器官叶片的光合作用<sup>[19-20]</sup>,灌浆物质“源”不足,导致小麦干物质积累量下降。本试验中,低温胁迫显著降低了小麦植株和各器官干物质的积累量。小麦产量是由花前茎叶贮存物质的再分配和花后光合产物积累形成的<sup>[21]</sup>,低温胁迫导致花前植株光合作用贮存于叶片、茎秆和叶鞘的养分减少,不足以籽粒提供物质来源,因此各低温处理后小麦 CDMAA 显著增加。本研究表明,低温使干物质在小麦穗部的分配比例下降,但茎鞘+叶片分配比例上升,这可能是因为小麦茎秆的输导组织受损,阻碍了同化物向籽粒的运输,使营养物质更多地滞留在叶片和茎鞘等非生殖器官中。

小麦的抗寒性是一个受多种因素影响的复杂数量性状,不同抗寒性品种的抗寒机制也不尽相同。抗寒能力强弱不同的小麦,在各低温胁迫下的干物质积累、转运及分配过程也存在差异。抗寒能力强的小麦具有较强的自我保护机制<sup>[22]</sup>,可缓解低温逆境下小麦受伤害程度,合成更多的干物质,运输光

合产物的能力更强,从而获得更高的产量。本试验中,YN19 转运到穗部的同化物更多,表明小麦抗寒力强有利于花前花后同化物的生产、积累及其向籽粒中运输与分配。最终 YN19 穗粒数下降幅度显著低于抗寒力弱的品种 XM26,这是其在低温胁迫下获得较高产量的主要原因。因此,对于易发生倒春寒危害的小麦生产地区而言,生产上应首选抗倒春寒能力强的小麦品种,从而缓解倒春寒灾害对小麦产量造成的损失。

### 3.2 药隔期低温胁迫对小麦产量及其构成因素的影响

在小麦不同生育时期低温胁迫对产量及其构成因素的影响不同。陈思思等<sup>[23]</sup>研究发现,拔节期低温导致小麦幼穗受冻,造成部分茎蘖冻死,穗数显著减少,这是造成减产的主要原因。张军等<sup>[24]</sup>指出,孕穗期低温胁迫使小麦穗粒数显著下降,但对千粒重的影响不大。吴青霞等<sup>[25]</sup>研究发现,药隔期低温胁迫对小麦的减产效应主要源于单株穗数的减少,产量构成中以单株穗数的下降最为明显。本研究中,造成小麦减产的主要原因是穗粒数的减少,低温对穗数的影响不显著,这与前人研究存在差异。可能是因为前人研究中低温胁迫的时间较长,使小麦主茎和大分蘖冻死,导致穗数减少。而在实际生产中,大田倒春寒灾害的发生并不会出现长时间连续的低温。研究指出<sup>[26]</sup>,倒春寒在凌晨 2:00—6:00 时段发生频率最高,本试验根据安徽省小麦倒春寒的发生规律,在凌晨 1:00—5:00 进行低温处理,更为符合大田自然降温规律。因此,药隔期低温胁迫主要减少干物质自“源”器官叶片向“库”器官穗部的转运,导致小麦穗部营养供给不足,影响小穗小花发育,减小“库”容量<sup>[27]</sup>,从而导致穗部结实率降低和产量下降。

今后将进一步结合 CERES-Wheat、CropSyst 和 WOFOST 等<sup>[28]</sup>生长模型探索干物质积累过程机理,深入研究低温胁迫与干物质积累的定量关系,从而为中国小麦生产的防灾减灾和提质增效提供理论依据。

## 参考文献:

- [1] JI H T, XIAO L J, XIA Y M, et al. Effects of jointing and booting low temperature stresses on grain yield and yield components in wheat[J]. *Agric For Meteorol*, 2017, 243: 33-42.
- [2] WANG S S, MO X G, LIU Z J, et al. Understanding long-term (1982-2013) patterns and trends in winter wheat spring green-up date over the North China Plain[J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 2017, 57: 235-244.
- [3] ZHENG B, CHAPMAN S C, CHRISTOPHER J T, et al. Frost trends and their estimated impact on yield in the Australian wheatbelt[J]. *J Exp Bot*, 2015, 66(12): 3611-3623.
- [4] 张乐乐, 陈翔, 柯媛媛, 等. 冬小麦抗倒春寒性能鉴定方法和指标的比较[J]. *中国农业气象*, 2021, 42(2): 146-157.
- [5] HOLMAN J D, SCHLEGEL A J, THOMPSON C R, et al. Influence of precipitation, temperature, and 56 years on winter wheat yields in western Kansas[J]. *Crop Manag*, 2011, 10(1): 1-10.
- [6] 陈翔, 林涛, 林非非, 等. 黄淮麦区小麦倒春寒危害机理及防控措施研究进展[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(2): 243-250.
- [7] 罗新兰, 张彦, 孙忠富, 等. 黄淮平原冬小麦霜冻害时空分布特点的研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(18): 45-50.
- [8] 陈贵菊, 陈明丽, 王福玉, 等. 药隔期低温对小麦生长发育的影响[J]. *山东农业科学*, 2015, 47(2): 25-28.
- [9] 李晓林, 白志元, 杨子博, 等. 黄淮麦区部分主推冬小麦品种越冬及拔节期的抗寒生理研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(1): 40-48.
- [10] LIU L L, JI H T, AN J P, et al. Response of biomass accumulation in wheat to low-temperature stress at jointing and booting stages[J]. *Environ Exp Bot*, 2019, 157: 46-57.
- [11] 吴祯, 张保军, 海江波, 等. 不同种植方式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(10): 1377-1382.
- [12] 牟会荣, 姜东, 戴廷波, 等. 遮荫对小麦旗叶光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 599-606.
- [13] 任德超, 胡新, 陈丹丹, 等. 不同低温处理对小麦光合特性和产量性状的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(21): 44-50.
- [14] 南镇武, 刘月兰, 孟维伟, 等. 早春低温之前喷施外源调控物质对冬小麦的干物质转运、产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(9): 1090-1096.
- [15] 夏煜民. 拔节期和孕穗期双重低温对小麦生长发育及产量形成影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [16] ZHENG J C, LIU T, ZHENG Q X, et al. Identification of cold tolerance and analysis of genetic diversity for major wheat varieties in Jianghuai region of China[J]. *Pak J Bot*, 2020, 52(3): DOI:10.30848/pjb2020-3(23).
- [17] 吕广德, 王瑞霞, 牟秋焕, 等. 玉米小麦周年氮肥运筹对砂浆黑土区小麦干物质及氮素积累分配和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(8): 972-980.
- [18] 陈年来. 作物库源关系研究进展[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(1): 1-10.
- [19] ZHANG W, WANG J, HUANG Z, et al. Effects of low temperature at booting stage on sucrose metabolism and endogenous hormone contents in winter wheat spikelet[J]. *Front Plant Sci*, 2019, 10: 498.
- [20] 关雅楠, 黄正来, 张文静, 等. 低温胁迫对不同基因型小麦品种光合性能的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1895-1899.
- [21] 冀传允, 冯盛焯, 孙允超, 等. 不同时期喷施调控剂对冬小麦产量及其干物质积累与分配的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(10): 108-112.
- [22] 张自阳, 王智煜, 王斌, 等. 春季穗分化阶段低温处理对不同小麦品种幼穗结实性及生理特性的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(4): 130-139.
- [23] 陈思思, 李春燕, 杨景, 等. 拔节期低温冻害对扬麦 16 光合特性及产量形成的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2014, 35(3): 59-64.
- [24] 张军, 鲁敏, 孙树贵, 等. 拔节期低温胁迫对小麦生理生化特性和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(2): 73-79.
- [25] 吴青霞, 杨林, 邵慧, 等. 药隔期低温胁迫对小麦生理及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(4): 752-757.
- [26] 刘红杰, 倪永静, 任德超, 等. 黄淮冬麦区晚霜冻易发时段冠层内最低气温分布及估算[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(12): 786-795.
- [27] 高芸, 张玉雪, 马泉, 等. 春季低温对小麦花粉育性及粒数形成的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 104-115.
- [28] 肖浏骏, 刘蕾蕾, 邱小雷, 等. 小麦生长模型对拔节期和孕穗期低温胁迫响应能力的比较[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(3): 504-521.