

网络出版时间:2024-05-11

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20240509.1043.014

## 磷肥后移对倒春寒下小麦主茎穗结实特性的影响

吴兆晨<sup>1</sup>, 秦成磊<sup>1</sup>, 尹鹏程<sup>1</sup>, 孙铭赫<sup>1</sup>, 徐凯琳<sup>1</sup>, 郑宝强<sup>1</sup>, 陈翔<sup>1</sup>, 李金才<sup>1,2</sup>

(1. 安徽农业大学农学院/农业部华东地区作物栽培科学观测站, 安徽合肥 230036;

2. 江苏省现代作物生产协同创新中心, 江苏南京 210095)

**摘要:** 为探究施磷模式对倒春寒下小麦穗部结实特性的影响, 于2022—2023年选用抗倒春寒性弱的小麦品种新麦26和抗倒春寒性强的烟农19为供试材料, 采用大田盆栽种植的方式, 利用低温光照培养箱进行倒春寒模拟试验, 分析了常温+磷肥全部基施、常温+50%磷肥后移、倒春寒+磷肥全部基施和倒春寒+50%磷肥后移处理下两个小麦品种的主茎穗结实特性。结果表明, 与常温相比, 倒春寒显著降低了新麦26和烟农19主茎穗结实粒数和单穗重, 单穗结实粒数降幅分别为25.63%和23.43%, 单穗重降幅分别为26.74%和20.65%, 其中两个品种下部小穗的结实粒数降幅均最大(降幅分别为40.21%和31.91%), 结实粒数降幅最大的粒位分别为第3和第4粒位(降幅分别为40.00%和80.77%)。常温条件下, 磷肥后移后两个品种主茎单穗重较磷肥全部基施分别提高了9.37%和19.48%, 结实粒数分别提高了11.17%和8.45%, 结实粒数增幅最大的小穗位分别为下部和上部小穗(增幅分别为30.93%和31.25%), 烟农19千粒重显著增加(增幅12.49%)。与磷肥全部基施相比, 倒春寒危害下磷肥后移显著增加两个品种的主茎穗结实粒数和单穗重, 结实粒数增幅分别为22.53%和14.20%, 单穗重增幅分别为25.94%和10.96%, 新麦26结实粒数增幅最大的小穗位和粒位分别为下部小穗和第3粒位(分别增加了101.72%和42.86%); 而烟农19结实粒数增幅最大的小穗位为上部小穗(增加73.68%)。综上所述, 倒春寒会降低小麦主茎穗结实粒数和单穗重, 磷肥后移可通过提高主茎穗结实粒数和单穗重减轻倒春寒对小麦穗部结实的影响。

**关键词:** 小麦; 倒春寒; 磷肥后移; 结实粒数; 粒重

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)02-0204-09

## Effects of Phosphorus Fertilizer Postpone on the Grain Setting Characteristics of Wheat Main Stem Spike under Late Spring Coldness

WU Zhaochen<sup>1</sup>, QIN Chenglei<sup>1</sup>, YIN Pengcheng<sup>1</sup>, SUN Minghe<sup>1</sup>, XU Kailin<sup>1</sup>,

ZHENG Baoqiang<sup>1</sup>, CHEN Xiang<sup>1</sup>, LI Jincan<sup>1,2</sup>

(1. College of Agronomy, Anhui Agricultural University/ Crop Cultivation Science Observatory in East China of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei, Anhui 230036, China; 2. Collaborative Innovation Center of Modern Crop Production in Jiangsu, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** To investigate the effect of phosphorus application mode on the grain setting characteristics of wheat ears under late spring coldness, wheat varieties Xinmai 26 with weak resistance to late spring coldness and Yannong 19 with strong resistance to late spring coldness were selected as experimental materials from 2022 to 2023. Field pot planting was adopted, and a low temperature light incubator was used to simulate late spring coldness. The main stem and grain setting characteristics of two wheat varieties were analyzed under the treatments of full basal application of phosphorus fertilizer

收稿日期: 2024-01-05 修回日期: 2024-02-05

**基金项目:** 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2023-103); 安徽农业大学校级大学生创新创业训练计划项目(X202210364622); 淮河流域砂姜黑土产能提升综合技术模式与应用(2023YFD1901005); “十四五”安徽省现代农业产业技术体系建设专项(340000222426000100009); 淮北市农业科学院科研项目(YL202306)

**第一作者** E-mail: wuzhaochen1226@163.com (吴兆晨)

**通讯作者** E-mail: ljec5122423@126.com (李金才); cxagricultural@163.com (陈翔)

under conventional temperature, 50% of phosphorus fertilizer postpone under conventional temperature, full basal application of phosphorus fertilizer under late spring coldness, and 50% of phosphorus fertilizer postpone under late spring coldness. The results showed that compared with normal temperature, the late spring coldness significantly reduced the number of grains and weight per spike in the main stem of Xinmai 26 and Yannong 19, with a decrease rate of 25.63% and 23.43%, respectively, and a decrease rate of 26.74% and 20.65% in weight per spike, respectively. Among them, the number of grains in the lower spikelets of both varieties decreased the most (40.21% and 31.91%, respectively). The grain position with the largest decrease in grain number was the third and fourth grain positions (40.00% and 80.77%, respectively). Under normal temperature conditions, after applying phosphorus fertilizer, the single spike weight of the main stem of the two varieties was higher than that of the full basal phosphorus fertilizer, with an increase rate of 9.37% and 19.48%, respectively, and the number of grains was increased by 11.17% and 8.45%, respectively. The largest increase in grain number was observed in the lower and upper spikelets (with increase rate of 30.93% and 31.25%, respectively). The thousand-grain weight of Yannong 19 significantly increased (with an increase rate of 12.49%). Compared with the full basal application of phosphorus fertilizer, the postpone of phosphorus fertilizer significantly increased the number of grains and weight per spike in the main stem of two varieties under the risk of late spring coldness. The increase rate of grain number per spike was 22.53% and 14.20%, and the increase rate of grain weight per spike was 25.94% and 10.96%, respectively. The highest increase in grain number in Xinmai 26 was observed in the lower spikelet and the third grain position (with an increase rate of 101.72% and 42.86%, respectively); The spikelet position with the largest increase in grain number of Yannong 19 was the upper spikelet (with an increase rate of 73.68%). In summary, late spring coldness can reduce the number of grains and weight per spike in the main stem of wheat. After applying phosphorus fertilizer, applying phosphorus postpone can alleviate the impact of late spring coldness on wheat spike fruiting by increasing the number of grains and weight per spike in the main stem.

**Keywords:** Wheat; Late spring coldness; Phosphorus fertilizer postpone; Grain number per spike; Grain weight

作为中国第二大口粮作物,小麦在中国广泛种植<sup>[1]</sup>。黄淮海区是中国小麦主产区,其种植面积和产量均占全中国的半数以上,对保障国家粮食安全起着极其重要的作用<sup>[2]</sup>。全球气候变暖背景下,极端气候灾害事件频发重发,增加了黄淮海区小麦生产的不稳定性<sup>[3]</sup>。倒春寒是影响黄淮海区小麦生产的重要农业气象灾害之一<sup>[4]</sup>。据报道,该地区在 2009、2013、2015、2018 和 2020 年发生了大规模的倒春寒灾害<sup>[4]</sup>。由于倒春寒灾害发生的随机性和不可预见性,相关预防和补救措施常难以及时跟上<sup>[5]</sup>。因此,倒春寒已成为黄淮海区小麦生产可持续高质量发展的重要限制因素。

磷是小麦生长发育过程中不可或缺的重要营养元素。磷素供应不足会抑制小麦分蘖的发生和根系的发育,同时降低叶片的光合性能,影响小麦产量的形成<sup>[6-9]</sup>。小麦穗花发育过程中可孕小花

的退化和败育是决定结实粒数的关键<sup>[10]</sup>。研究发现,小麦穗部小花的死亡多发生在对磷等营养元素需求较高的茎和穗快速伸长期间<sup>[11]</sup>;小麦穗茎器官对同化物的竞争最终会导致磷等养分短缺,从而使小花原基败育<sup>[12]</sup>。磷也是作物应对低温胁迫等非生物胁迫时所需的重要元素<sup>[13]</sup>。低温胁迫下施磷可有效促进小麦生长,增加磷素和干物质积累量<sup>[14]</sup>;倒春寒下喷施磷酸二氢钾可缓解小麦产量损失<sup>[15]</sup>。这说明,磷肥对低温胁迫下小麦的生长发育和产量形成具有十分重要的作用。

黄淮海区的倒春寒多发生在小麦拔节—孕穗期。倒春寒会显著降低小麦产量<sup>[16]</sup>。倒春寒对小麦主茎穗的结实粒数和单穗重影响较大,尤其是下部和上部小穗位的结实粒数<sup>[17]</sup>。研究表明,倒春寒下小麦穗部结实粒数的降低主要原因是花

药中淀粉和蛋白质等物质的积累减少,使花粉发育所需的营养物质不足,从而导致其败育率增加<sup>[18]</sup>。拔节—孕穗期是小麦对磷的需求量和吸收强度较高的时期<sup>[9]</sup>。由于磷素易被土壤以吸附、化学反应等方式固定<sup>[19]</sup>,传统的“一炮轰”施磷方式已不能满足该时期小麦对磷素的需求。通过磷肥分次施用可提升土壤速效磷和活性磷含量,降低磷素固定率<sup>[20]</sup>。倒春寒下磷肥后移可通过提高小麦主茎穗结实粒数来减少产量损失<sup>[21]</sup>,但磷肥后移对倒春寒下小麦穗部结实特性的影响尚不清楚。本研究选用新麦 26 和烟农 19 两个抗倒春寒性强弱不同的小麦品种,采用磷肥全部基施和 50%磷肥后移(基追并重)两种施磷模式,探究磷肥后移对倒春寒下小麦主茎穗结实特性的影响,以期为小麦生产中倒春寒防御提供理论支撑。

## 1 材料和方法

试验于 2022—2023 年在安徽农业大学国家高新技术农业园进行。在前期研究的基础上<sup>[22]</sup>,本研究选用抗倒春寒性弱的品种新麦 26 和抗倒春寒性强的品种烟农 19 为供试材料,以大田盆栽方式进行种植。盆栽土取自试验地大田 0~20 cm 耕层,土壤类型为棕壤土,pH 值为 5.7,有机质、全氮、速效磷和速效钾含量分别为 14.53 g·kg<sup>-1</sup>、1.03 g·kg<sup>-1</sup>、18.25 mg·kg<sup>-1</sup> 和 256.02 mg·kg<sup>-1</sup>。盆栽桶直径为 26 cm,高度为 35 cm,每盆装土 15 kg。小麦播种日期为 2022 年 11 月 10 日,每盆播种 18 粒。小麦播种后将盆子埋入大田,盆内土面与大田持平。三叶期定苗,定苗后每盆留苗 9 株,拔节期(2023 年 3 月 12 日)进行追肥。

### 1.1 试验设计

试验采用裂区设计,分别以磷肥施用模式和温度为主区和副区。其中,磷肥施用设全部基施和 50%磷肥后移两种模式,温度设置对照(常温 15℃,CK)和倒春寒(低温-4℃,LT)两个水平,形成常温+磷肥全部基施处理(CKR1)、常温+50%磷肥后移(CKR2)、倒春寒+磷肥全部基施(LTR1)和倒春寒+50%磷肥后移(LTR2)4 个处理。每盆基施尿素 3.46 (N 含量 46%)g 和硫酸钾 2.90 g(K<sub>2</sub>O 含量 51%),追施尿素 3.46 g;每盆磷肥总施用量为 3.36 g(过磷酸钙,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量 16%),其中磷肥后移处理的基施和追施量各占 50%。倒春寒通过低温光照培养箱来进行模拟;

2023 年 3 月 31 日,小麦植株主茎幼穗发育到药隔期(主茎倒二叶和第三节间开始伸长时),每个处理取 5 盆长势基本一致小麦夜间移入低温光照培养箱进行低温处理,具体操作参照孙东岳等<sup>[21]</sup>的方法(图 1)。模拟倒春寒处理后迅速将小麦盆原位埋回大田至小麦成熟。小麦全生育期间管理同一般高产大田。

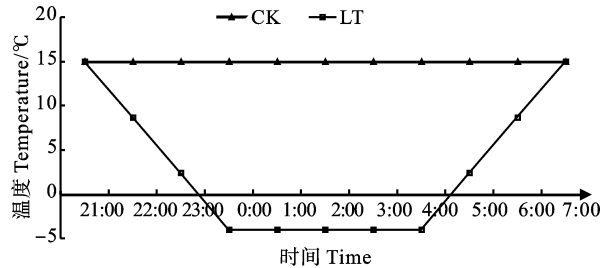


图 1 试验期培养箱内温度变化(2023 年 3 月 31—4 月 1 日)

Fig. 1 Temperature change in the incubator during the experiment ( March 31—April 1, 2023)

### 1.2 测定项目与方法

成熟期(2023 年 5 月 25 日)各处理取 7 株长势基本一致的小麦植株,将主茎穗单独分出,用烘箱 105℃杀青 30 min 后 75℃烘干至恒重。参考屈会娟等<sup>[23]</sup>的方法,将主茎穗自基部第 1 个小穗至顶小穗依次编号,将麦穗划分为下、中、上三个部分(分别为第 1~第 7 小穗、第 8~第 15 小穗、第 16~顶小穗)。按照粒位将每小穗基部第 1 粒位、第 2 粒位、第 3 粒位和第 4 粒位分别记为 G1、G2、G3 和 G4。将不同小穗位不同粒位的籽粒对号装袋、计数,并分别利用万分之一电子天平(ME204E/02)称量籽粒干重。各处理主茎穗从基部第 1 小穗至顶小穗不同粒位结实粒数之和记为该粒位结实总粒数(即 G1 结实总粒数为主茎穗从基部第 1 小穗至顶小穗所有小穗第 1 粒位结实粒数之和,G2、G3、G4 依此类推)。各处理主茎穗从基部第 1 小穗至顶小穗不同粒位籽粒干重之和记为该粒位结实总粒重(即 G1 结实总粒重为主茎穗从基部第 1 小穗至顶小穗所有小穗第 1 粒位籽粒干重之和,G2、G3、G4 依此类推)。主茎穗籽粒干重之和记为该主茎单穗重。

### 1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 23.0 软件进行数据的方差分析(ANOVA),数据均采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性比较( $P < 0.05$ )。采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据汇总与制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷肥后移对倒春寒下小麦主茎单穗重、结实粒数及千粒重的影响

倒春寒显著降低了小麦主茎单穗重;磷肥后移显著增加了小麦主茎单穗重(表 1)。与 CKR1 处理相比,LTR1 处理下新麦 26 和烟农 19 的主茎单穗重分别降低 26.74%和 20.56%,结实粒数分别降低 25.63%和 23.43%,千粒重差异不显

著。与 CKR1 处理相比,CKR2 处理下新麦 26 和烟农 19 主茎单穗重、结实粒数和千粒重均不同程度提高,其中烟农 19 单穗重和千粒重变化显著,增幅分别为 19.48%和 12.49%。与 LTR1 处理相比,LTR2 处理下新麦 26 和烟农 19 主茎单穗重分别提高了 25.94%和 10.96%,结实粒数分别提高了 22.53%和 14.20%,千粒重差异不显著。由此说明,倒春寒危害下,磷肥后移可显著改善小麦主茎穗结实特性,提高单穗生产能力。

表 1 不同处理下小麦主茎单穗重、结实粒数及千粒重

Table 1 Single spike yield, grain number per spike and thousand-grain weight of wheat main stem and spike under different treatments

处理 Treatment	新麦 26 Xinmai 26			烟农 19 Yannong 19		
	单穗重 Single spike yield/g	结实粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand-grain weight/g	单穗重 Single spike yield/g	结实粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand-grain weight/g
CKR1	2.47±0.09ab	56.29±2.09ab	43.88±0.44a	2.18±0.09b	59.14±2.05a	36.94±1.13b
CKR2	2.70±0.09a	62.57±2.02a	43.08±0.34a	2.61±0.10a	64.14±1.74a	41.56±0.96a
LTR1	1.81±0.06c	41.86±2.15c	43.54±1.33a	1.73±0.11c	45.29±2.46c	38.16±0.54b
LTR2	2.28±0.18b	51.29±3.57b	44.37±1.19a	1.92±0.05bc	51.71±1.46b	37.26±1.19b

同列数值后不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下表同。

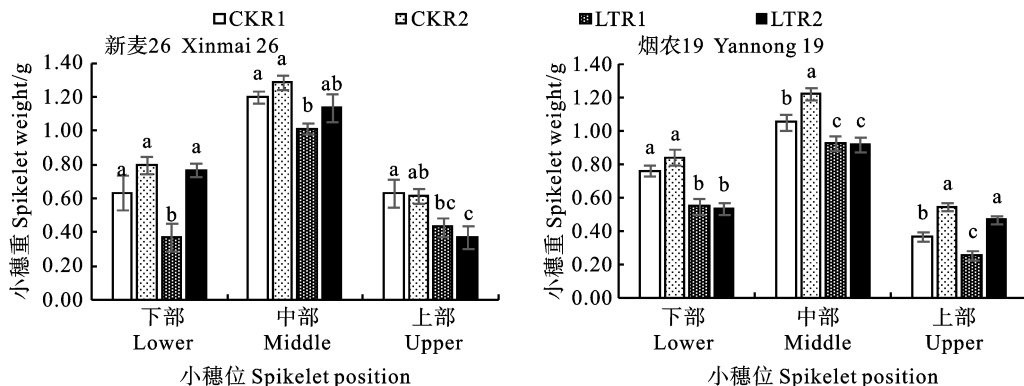
Different letters after the values within the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in tables 2 and 3.

### 2.2 磷肥后移对倒春寒下小麦主茎不同小穗位小穗重的影响

#### 2.2.1 主茎穗不同小穗位小穗重

倒春寒显著降低小麦主茎穗不同部位小穗重,磷肥后移增加了主茎穗不同部位小穗重(图 2)。与 CKR1 处理相比,LTR1 处理下新麦 26 的下部、中部、上部小穗重分别降低了 42.15%、15.97%和 31.87%;烟农 19 的下部、中部、上部小穗重分

别降低了 27.86%、12.20%和 29.97%。与 CKR1 处理相比,CKR2 处理下烟农 19 的中部和上部小穗重显著增加,增幅分别为 15.88%和 48.84%。与 LTR1 处理相比,LTR2 处理下新麦 26 的下部小穗重和烟农 19 的上部小穗重均显著增加,增幅分别为 109.44%和 82.24%。这说明,磷肥后移可显著提高倒春寒下新麦 26 下部小穗和烟农 19 上部小穗的生产能力。



图柱上不同字母表示不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下图同。

Different letters above the bars indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same in figures 3-5.

图 2 不同处理下小麦主茎穗小穗重随小穗位的变化

Fig. 2 Variation of spikelet weight with spikelet positions on wheat main stem under different treatments

### 2.2.2 主茎穗不同小穗位结实粒数

倒春寒降低了小麦主茎不同小穗位结实粒数,磷肥后移增加了小麦主茎不同小穗位结实粒数(图 3)。与 CKR1 处理相比,LTR1 处理下两个品种下、中、上三个部位的小穗结实总粒数均不同程度下降,其中新麦 26 分别降低了 40.21%、15.51%和 30.00%,烟农 19 分别降低了 31.91%、15.03%和 28.75%。与 CKR1 处理相比,CKR2 处理下烟农 19 上部小穗结实总粒数显著增加,增

幅为 31.25%,其余部位的小穗结实总粒数差异不显著。与 LTR1 处理相比,LTR2 处理下新麦 26 下部小穗和烟农 19 上部小穗结实总粒数均显著增加,增幅分别为 101.72%和 73.68%。综上所述,倒春寒对小麦主茎穗下部和上部小穗结实粒数的负效应大于中部小穗,磷肥后移可提高倒春寒下不同部位小穗位小穗结实粒数,其中新麦 26 和烟农 19 分别以下部小穗和上部小穗结实粒数增加最显著。

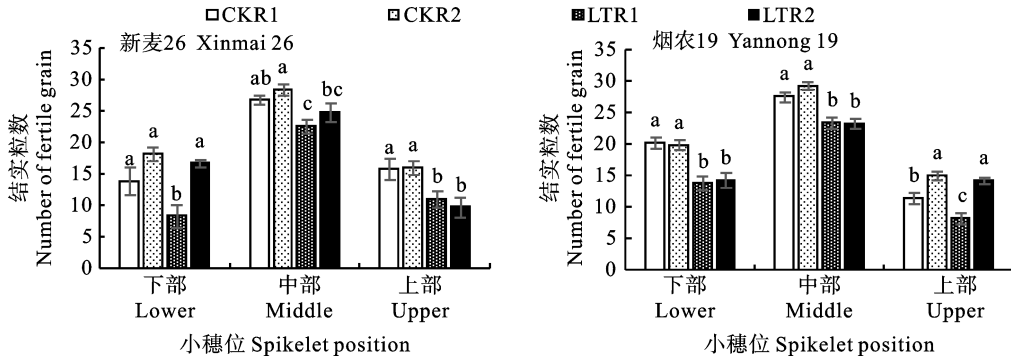


图 3 不同处理下小麦主茎穗小穗结实粒数随小穗位置的变化

Fig. 3 Variation of the fertile grain number of spikelet with spikelet positions on wheat main stem under different treatments

### 2.2.3 小麦主茎穗不同小穗位单粒重

倒春寒对小麦主茎穗不同部位小穗位单粒重影响不大;磷肥后移对常温条件下小麦主茎穗不同部位小穗位单粒重有一定正效应,对倒春寒下小麦主茎穗不同部位小穗位单粒重影响不明显(图 4)。与 CKR1 处理相比,LTR1 处理下两个

品种不同部位小穗位单粒重差异不显著。与 CKR1 处理相比,CKR2 处理下烟农 19 主茎穗下、中、上三个部位的小穗位单粒重均显著增加,增幅分别为 11.46%、8.86%和 13.30%。与 LTR1 处理相比,LTR2 处理下两个品种不同部位小穗位单粒重差异也不显著。

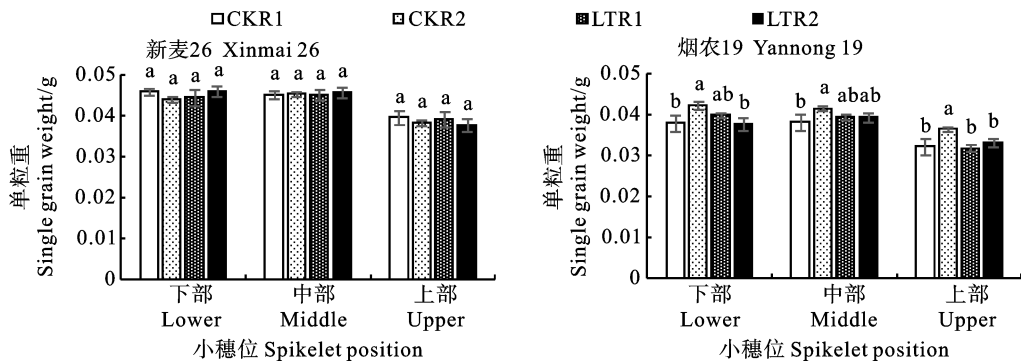


图 4 不同处理下小麦主茎不同小穗位单粒重

Fig. 4 Single grain weight of different spikelet positions on wheat main stem under different treatments

## 2.3 磷肥后移对倒春寒下小麦主茎穗不同粒位总粒重的影响

### 2.3.1 小麦主茎穗不同粒位结实总粒重

倒春寒和磷肥后移施磷分别降低和增加了小麦主茎穗不同粒位总粒重(表 2)。与 CKR1 处理相比,LTR1 处理下两个品种不同粒位总粒重均

有一定程度的下降,其中新麦 26 的 G1、G2、G3 总粒重分别降低了 14.66%、16.00%和 42.94%,烟农 19 的 G2、G3、G4 总粒重分别降低了 15.82%、22.39%和 80.87%,差异均达到显著水平。与 CKR1 处理相比,CKR2 处理增加了两个品种不同粒位总粒重,其中烟农 19 的 G1、G2 总粒重分

别增加了 21.55% 和 15.80%，差异显著。与 LTR1 处理相比，LTR2 处理增加了两个品种不同粒位总粒重，其中新麦 26 的 G2、G3 总粒重分别增加了 14.42% 和 51.46%，烟农 19 的 G1、G2 分别增加了 12.39% 和 14.52%，差异均显著。综上所述，倒春寒小麦主茎穗弱势粒位 G3、G4 的总粒重影响相对较大，磷肥后移可增加倒春寒下各粒位总粒重。

### 2.3.2 小麦主茎穗不同粒位结实粒数

倒春寒和磷肥后移施磷分别降低和增加了小麦主茎穗不同粒位的结实粒数(表 3)。不同处理下两个品种的主茎穗不同粒位结实粒数均表现为 G1>G2>G3>G4。与 CKR1 处理相比，LTR1 处理下新麦 26 的 G1、G2、G3 和 G4 结实粒数分别降低了 12.69%、12.82%、40.00% 和 71.05%，烟农 19 的 G1、G2、G3 和 G4 结实粒数分别降低了 8.46%、15.20%、23.36% 和 80.77%。与 CKR1 处理相比，CKR2 处理下新麦 26 各粒位的结实粒数均有所增加，但差异不显著；烟农 19 各粒位中仅 G1 显著增加，增幅 10.77%。与 LTR1 处理相

比，LTR2 处理下新麦 26 的 G2 和 G3 结实粒数均显著提高(增幅分别为 14.71% 和 42.86%)；烟农 19 的 G1 和 G2 结实粒数均显著提高(增幅分别为 15.13% 和 17.92%)。由此可见，倒春寒对小麦主茎穗 G3、G4 结实粒数的负效应较大，倒春寒下磷肥后移可显著改善新麦 26 的 G2、G3 和烟农 19 的 G1、G2 结实特性。

### 2.3.3 小麦主茎穗不同粒位单粒重

与 CKR1 处理相比，LTR1 处理下两个品种不同粒位单粒重差异不显著。与 CKR1 处理相比，CKR2 处理下烟农 19 主茎穗 G1、G2、G3 单粒重分别增加 9.83%、9.50% 和 12.69%，差异均显著。与 LTR1 处理相比，LTR2 处理下两个品种不同粒位单粒重除新麦 26 的 G4 外均差异不显著(新麦 26 的 G4 由于结实粒数较少而误差较大)(图 5)。这说明，倒春寒对小麦主茎穗不同粒位单粒重影响不大；磷肥后移施磷对倒春寒危害下小麦主茎穗不同粒位单粒重增加效果不明显；常温条件下磷肥后移施磷模式对小麦主茎穗不同粒位单粒重有一定正效应。

表 2 不同处理下小麦主茎穗不同粒位总粒重

Table 2 Total grain weight at different grain positions of wheat main stem under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	总粒重 Total grain weight/g			
		G1	G2	G3	G4
新麦 26 Xinmai 26	CKR1	0.84±0.03a	0.82±0.03ab	0.62±0.04ab	0.18±0.05ab
	CKR2	0.87±0.02a	0.90±0.03a	0.67±0.02a	0.26±0.04a
	LTR1	0.72±0.04b	0.69±0.03c	0.36±0.03c	0.04±0.02b
	LTR2	0.79±0.04ab	0.79±0.03b	0.54±0.04b	0.15±0.07ab
烟农 19 Yannong 19	CKR1	0.73±0.03bc	0.74±0.03b	0.52±0.03a	0.19±0.03a
	CKR2	0.89±0.02a	0.85±0.03a	0.61±0.03a	0.25±0.03a
	LTR1	0.67±0.03c	0.62±0.03c	0.41±0.04b	0.04±0.02b
	LTR2	0.75±0.02b	0.71±0.02b	0.43±0.03b	0.04±0.02b

表 3 不同处理下小麦主茎穗不同粒位结实粒数

Table 3 Fertile grain number at different grain positions of wheat main stem under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	结实总粒数 Number of total grains			
		G1	G2	G3	G4
新麦 26 Xinmai 26	CKR1	19.14±0.40ab	16.71±0.52a	15.00±0.69ab	5.43±1.39ab
	CKR2	19.86±0.40a	18.71±0.61a	16.14±0.46a	7.86±1.20a
	LTR1	16.71±0.99c	14.57±0.97b	09.00±0.90c	1.57±0.69b
	LTR2	17.57±0.61bc	16.71±0.57a	12.86±1.01b	4.14±2.01ab
烟农 19 Yannong 19	CKR1	18.57±0.37b	17.86±0.51a	15.29±0.68a	7.43±1.00a
	CKR2	20.57±0.30a	18.86±0.51a	15.86±0.34a	8.86±0.91a
	LTR1	17.00±0.53c	15.14±0.59b	11.71±1.23b	1.43±0.97b
	LTR2	19.57±0.37ab	17.86±0.46a	12.71±0.84b	1.57±0.81b

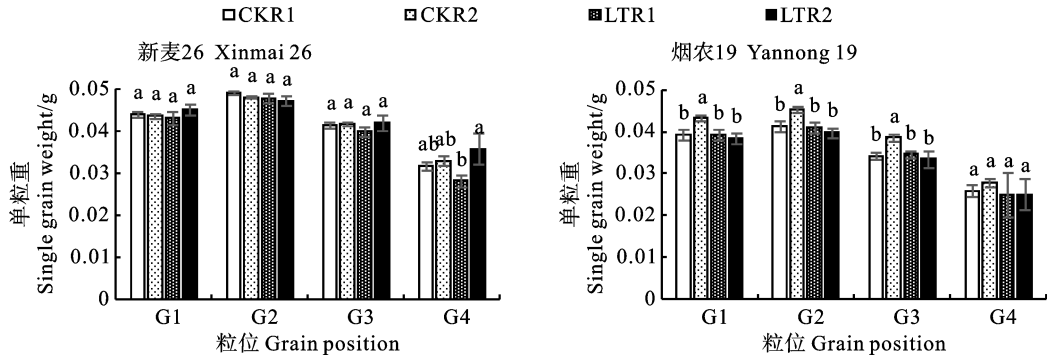


图 5 不同处理下小麦主茎各粒位单粒重

Fig. 5 Single grain weight of different grain positions on wheat main stem under different treatments

### 3 讨论

作为黄淮麦区的主要农业气象灾害之一，倒春寒多发生在小麦穗分化的关键时期<sup>[24]</sup>，也是决定小麦结实粒数的关键时期<sup>[25]</sup>。小麦小花退化数量是影响其最终结实粒数的关键因素<sup>[26]</sup>。研究发现，春季低温导致的小麦结实粒数降低是由于小麦孕穗期遭遇低温后花粉母细胞减数分裂时染色体配对紊乱，延迟了花药绒毡层的降解，同时花药中淀粉、蛋白质等物质的积累量下降使花粉发育营养物质不足，从而导致其败育率增加，使穗部结实粒数降低<sup>[18]</sup>。本研究中，倒春寒显著降低了小麦主茎穗结实粒数，且以上部、下部小穗和第3、第4粒位降幅较为明显，这与前人的研究结果基本一致<sup>[17]</sup>。本研究还发现，倒春寒下小麦主茎穗千粒重以及各粒位单粒重并没有显著下降，其原因可能在于结实粒数的减少缓解了其单粒重下降的趋势。

磷是小麦生长发育中不可或缺的元素<sup>[9]</sup>。优化施磷方式可提高可溶性糖及磷素在小麦穗部的含量，保障穗花发育所需的营养物质充分供应，促进小花发育和结实成粒，进而增加结实粒数，提高产量<sup>[27]</sup>。在营养生长期补充足够的磷对保障小麦穗部发育和抗逆性非常重要<sup>[28]</sup>。前期研究发现，倒春寒下磷肥后移可显著提高小麦主茎的结实粒数，从而增加产量<sup>[21]</sup>。本研究结果进一步表明，相较于常规的磷肥全部基施，倒春寒下磷肥后移施用后小麦主茎穗各小穗粒数均有上升趋势，结实粒数增加，产量得到提升。刘文珺等<sup>[29]</sup>认为，磷肥对小麦穗下部的小花发育有促进作用，磷肥不足会增加小花的退化率，从而降低其结实率，最终导致结实粒数下降。本研究中，倒春寒下磷

肥后移可显著提高抗倒春寒性弱的品种新麦 26 主茎穗下部小穗结实粒数的结果与其大致相同。采取有效措施促进不同小穗位小花的结实率，特别是第3、第4位的弱势小花是提高小麦结实粒数的重要途径<sup>[12]</sup>。本研究发现，倒春寒下磷肥后移后抗倒春寒性弱的品种新麦 26 主茎穗第3粒位结实粒数显著提升，表明磷肥后移可有效提高小麦幼穗抗倒春寒性，从而提高弱势小花的结实率，增加结实粒数，进而达到防灾减灾的目的。此外，本研究仅对倒春寒下磷肥后移的小麦主茎穗结实特性进行了比较分析，对小麦分蘖穗的结实特性尚不清楚，因此后续还需进一步探究磷肥后移施磷模式对倒春寒下分蘖穗结实特性的影响。

### 4 结论

倒春寒下小麦主茎单穗重降低主要是由其结实粒数下降导致的；其结实粒数降幅较大的小穗位为下部和上部小穗位，结实粒数降幅较大的粒位是第3、第4粒位。倒春寒危害下磷肥后移主要通过提高其结实粒数来增加单穗重，其中新麦 26 主茎结实粒数的提高主要通过提高下部小穗结实粒数和第3粒位结实粒数实现的；烟农 19 主茎结实粒数的提高主要通过上部小穗结实粒数提高实现的。常温条件下，磷肥后移可分别提高新麦 26 下部小穗和烟农 19 上部小穗的结实粒数以及烟农 19 的千粒重，进而提高其主茎单穗重。综上，磷肥后移主要通过增加倒春寒下小麦主茎结实粒数，进而增加其单穗重，从而达到防灾减灾、稳产增产的生产目标。

#### 参考文献:

[1]钟永玲,曹慧,张玉梅.中国小麦中长期供需趋势分析及建议

- [J]. 中国食物与营养, 2014, 20(9): 51.
- ZHONG Y L, CAO H, ZHANG Y M. Analysis of Chinese wheat supply and demand in medium and long term and suggestions [J]. *Food and Nutrition in China*, 2014, 20(9): 51.
- [2] 张会芳, 齐红志, 孙岩, 等. 黄淮冬麦区不同来源地新育成小麦品种性状多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2023, 24(3): 719.
- ZHANG H F, QI H Z, SUN Y, *et al.* Character diversity analysis of new wheat varieties from different origins in Huang-Huai winter wheat region [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(3): 719.
- [3] 周波涛. 全球气候变暖: 浅谈从 AR5 到 AR6 的认知进展[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667.
- ZHOU B T. Global warming: Scientific progress from AR5 to AR6 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(5): 667.
- [4] 陈翔, 于敏, 蔡洪梅, 等. 小麦倒春寒研究现状与进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2999.
- CHEN X, YU M, CAI H M, *et al.* Current status and research advances of late spring coldness in wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2999.
- [5] 张林, 陈翔, 刘绿洲, 等. 基于 Web of Science 全球小麦低温逆境的研究态势分析[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 16.
- ZHANG L, CHEN X, LIU L Z, *et al.* Research trend analysis of global wheat low-temperature stress based on Web of Science [J]. *Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(1): 16.
- [6] HEUER S, GAXIOLA R, SCHILLING R, *et al.* Improving phosphorus use efficiency: A complex trait with emerging opportunities [J]. *The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology*, 2017, 90(5): 868.
- [7] CONG W F, SURIYAGODA L D B, LAMBERS H. Tightening the phosphorus cycle through phosphorus-efficient crop genotypes [J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(10): 967.
- [8] CORDELL D, NESET T S S. Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 24: 108.
- [9] 胡承霖. 安徽麦作学[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2009.
- HU C L. Anhui wheat farming [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2009.
- [10] 谢炜, 贺鹏, 马宏亮, 等. 秸秆覆盖与施磷对旱地小麦小花发育与结实特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(4): 496.
- XIE W, HE P, MA H L, *et al.* Effects of straw mulching and phosphorus fertilization on floret development and seed-setting rate of dryland wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(4): 496.
- [11] GONZÁLEZ F G, MIRALLES D J, SLAFER G A. Wheat floret survival as related to pre-anthesis spike growth [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(14): 4889.
- [12] ZHENG C, ZHU Y, ZHU H, *et al.* Floret development and grain setting characteristics in winter wheat in response to pre-anthesis applications of 6-benzylaminopurine and boron [J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 70.
- [13] GONG Z, XIONG L, SHI H, *et al.* Plant abiotic stress response and nutrient use efficiency [J]. *Science China Life Sciences*, 2020, 63(5): 635.
- [14] 王海龙, 张民, 刘之广, 等. 温度和施磷对石灰性潮土小麦苗期生长及磷形态的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4135.
- WANG H L, ZHANG M, LIU Z G, *et al.* Effects of temperature and phosphorus application on wheat growth at seedling stage and phosphorus form in calcareous fluvo-aquic soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4135.
- [15] 代雯慈, 王捧娜, 翁颖, 等. 倒春寒逆境下叶面喷施磷酸二氢钾对小麦穗粒结实的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44(10): 889.
- DAI W C, WANG P N, WENG Y, *et al.* Effects of foliar spraying  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  on wheat grain setting characteristics under late spring coldness [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(10): 889.
- [16] ZHANG Y, LIU L, CHEN X, *et al.* Effects of low-temperature stress during the anther differentiation period on winter wheat photosynthetic performance and spike-setting characteristics [J]. *Plants*, 2022, 11(3): 389.
- [17] 陈翔, 于敏, 王捧娜, 等. 药隔期倒春寒对小麦主茎穗不同穗粒位结实数与粒重的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44(7): 575.
- CHEN X, YU M, WANG P N, *et al.* Effects of late spring coldness during the anther differentiation period on grain number and weight of wheat main stem at different spikelet and grain position [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(7): 575.
- [18] 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.
- GAO Y, ZHANG Y X, MA Q, *et al.* Effects of low temperature in spring on fertility of pollen and formation of grain number in wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 104.
- [19] 张淑香, 徐明岗. 中国土壤磷素演变与高效利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020: 1.
- ZHANG S X, XU M G. Evolution and efficient utilization of soil phosphorus in China [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020: 1.
- [20] 沈玉荣, 李然, 徐明岗, 等. 土壤有效磷和磷形态对磷肥施用次数的响应[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(10): 173.
- SHEN Y R, LI R, XU M G, *et al.* Responses of soil available phosphorus and phosphorus forms to phosphorus fertilizer application times [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(10): 173.
- [21] 孙东岳, 许辉, 刘倩倩, 等. 磷素后移对药隔期倒春寒小麦旗叶光合及抗氧化系统的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44

- (2):123.  
SUN D Y, XU H, LIU Q Q, *et al.* Effects of phosphorus fertilizer postpone on photosynthesis and antioxidant system of wheat flag leaves under late spring coldness at connectivum stage [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(2):123.
- [22] ZHANG Y, CAI H, LIU L, *et al.* Screening of varieties resistant to late-spring coldness in wheat and effects of late-spring coldness on the ultrastructure of wheat cells [J]. *Agronomy*, 2023, 13(12):3011.
- [23] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 等. 播种密度对冬小麦不同穗位与粒位结实粒数和粒重的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(10):1875.  
QU H J, LI J C, SHEN X S, *et al.* Effects of plant density on grain number and grain weight at different spikelets and grain positions in winter wheat cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(10):1875.
- [24] 曾正兵, 钟秀丽, 王道龙, 等. 冬小麦拔节后幼穗低温敏感期的鉴定[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(S1):297.  
ZENG Z B, ZHONG X L, WANG D L, *et al.* Identification of low temperature sensitive period of young spike after jointing in winter wheat [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(S1):297.
- [25] 崔金梅, 郭天财. 小麦的穗[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.  
CUI J M, GUO T C. Ear of wheat [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [26] ZHANG Z, LI Y, WU Y, *et al.* A dynamic regulation of nitrogen on floret primordia development in wheat [J]. *The Crop Journal*, 2024, 12(1):271.
- [27] 张艳艳, 关涵文, 刘淋茹, 等. 不同水分条件下施磷对冬小麦穗花发育及产量的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(10):2753.  
ZHANG Y Y, GUAN H W, LIU L R, *et al.* Effects of phosphorus application on spike and fertile floret development and yield of winter wheat under different water treatments [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(10):2753.
- [28] XU H, HASSAN M A, SUN D, *et al.* Effects of low temperature stress on source-sink organs in wheat and phosphorus mitigation strategies [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:807844.
- [29] 刘文珺. 氮磷施用量对冬小麦小花分化、退化与结实率的影响[J]. 甘肃农业科技, 2014(6):28.  
LIU W J. Effects of nitrogen and phosphorus application rate on floret differentiation, degeneration and seed setting rate of winter wheat [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2014(6):28.