

# 不同秸秆还田模式对早春受冻小麦生长及生理特性的影响

黄伟祥<sup>1</sup>,王菲菲<sup>1</sup>,唐志伟<sup>1</sup>,刘琴<sup>1</sup>,赵丰俊<sup>1</sup>,郑晓潇<sup>1</sup>,蔡洪梅<sup>1</sup>,  
翁颖<sup>1</sup>,王睿<sup>1</sup>,郑宝强<sup>1</sup>,李金才<sup>1,2</sup>,陈翔<sup>1</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:**为探讨秸秆还田对早春受冻下小麦幼苗生理特性的影响,基于农业农村部华东地区作物栽培科学观测站 15 年的长期定位试验,分析 2023—2024 年小麦秸秆全量粉碎覆盖还田+玉米秸秆不还田(T1)、小麦秸秆全量粉碎覆盖还田+玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T2)、小麦秸秆不还田+玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T3)和小麦秸秆不还田+玉米秸秆不还田(CK)4 种不同秸秆还田模式对早春受冻小麦幼穗发育、干物质积累、抗氧化酶活性、渗透调节物质等的影响,并通过主成分分析综合评价不同秸秆还田模式对早春受冻小麦的影响。结果表明,秸秆还田显著影响早春受冻下小麦幼穗发育及地上部和根系干物质积累。与 CK 相比,冻害后 T1、T2 和 T3 处理的幼穗伸长速率均显著提高,增幅分别为 36.19%、40.38%和 60.67%;T1 和 T3 处理的地上部和根系干物质均显著提高,其中地上部干物质分别增加 15.14%和 19.12%,根系干物质分别增加 13.05%和 10.26%。秸秆还田后早春冻害下小麦叶片和根系的抗氧化酶活性及渗透调节物质的含量均较 CK 增加,MDA 含量均降低。其中,T1 处理的叶片和根系 SOD、POD 活性与 CK 差异均显著,叶片和根系的 SOD 活性增幅分别为 140.08%和 71.47%,POD 活性增幅分别为 26.69%和 35.60%,MDA 含量分别下降 37.87%和 99.57%,可溶性蛋白含量分别提高 40.55%和 64.44%,脯氨酸含量分别提高 55.11%和 83.71%。主成分分析发现,不同处理的综合效应大小依次为 T1>T3>T2>CK。综合来看,秸秆还田可通过提高返青期小麦体内抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,增加植株抗寒能力,进而促进早春受冻小麦幼穗发育及植株干物质积累,以小麦秸秆全量粉碎覆盖还田处理效果最好。

**关键词:**小麦;秸秆还田模式;幼穗发育;干物质积累;抗氧化酶活性

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)08-1080-09

## Effect of Different Straw Returning Modes on the Growth and Physiological Characteristics of Wheat Seedlings under Freezing Stress in Early Spring

HUANG Weixiang<sup>1</sup>, WANG Feifei<sup>1</sup>, TANG Zhiwei<sup>1</sup>, LIU Qin<sup>1</sup>, ZHAO Fengjun<sup>1</sup>, ZHENG Xiaoxiao<sup>1</sup>,  
CAI Hongmei<sup>1</sup>, WENG Yin<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, ZHENG Baoqiang<sup>1</sup>, LI Jincai<sup>1,2</sup>, CHEN Xiang<sup>1</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 explore the effect of straw returning on the physiological characteristics of wheat seedlings subjected to freezing stress in early spring, a comparative analysis was conducted based on a 15-year long-term field experiment at the Crop Cultivation Science Observation Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs in East China region. From 2023 to 2024, four different straw-returning modes were evaluated for their effects on the growth and physiological traits of wheat seedlings under

收稿日期:2024-07-15

修回日期:2024-09-22

基金项目:十四五国家重点研发计划项目(2023YFD1901005)

第一作者 E-mail:19855995068@163.com(黄伟祥)

通讯作者 E-mail:cxagricultural@163.com(陈翔);ljc5122423@126.com(李金才)

freezing stress in early spring: full pulverization and surface coverage of wheat straw(T1), full pulverization and surface coverage of wheat straw and corn straw(T2), full pulverization and subsoil incorporation of corn straw(T3), and no incorporation of either wheat or corn straw(CK). Principal component analysis(PCA) was employed to construct a comprehensive evaluation model for the effect of different straw returning modes on the physiological indices of wheat under the conditions of freezing stress( $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) in early spring. The results indicated that straw returning had a significant influence on the development of wheat spikes and the accumulation of dry matter in above-ground parts and roots under the freezing stress in early spring. After the freezing injury, compared with CK, the spike length growth rate in T1, T2, and T3 treatments increased by 36.19%, 40.38%, and 60.67%, respectively. The dry matter weight of above-ground parts and roots in wheat treated with T1 and T3 increased, with an increase rate of 15.14% and 19.12% for above-ground parts, and 13.05% and 10.26% for roots, respectively. Compared to no straw returning, straw returning enhanced the antioxidant enzyme activity and the content of osmotic regulatory substances in wheat leaves and roots under freezing stress in early spring, while reducing the content of malondialdehyde(MDA). Specifically, the activities of superoxide dismutase(SOD) and peroxidase(POD) in leaves and roots in T1 treatment increased, with an increase rate of 140.08% and 71.47% for leaves, and 26.69% and 35.60% for roots compared to CK respectively, while the MDA content decreased significantly by 37.87% and 99.57%. The content of soluble protein and proline in leaves and roots in the T1 treatment increased significantly, with an increase rate of 40.55% and 64.44% for leaves, and 55.11% and 83.71% for roots, respectively. PCA revealed that the comprehensive physiological index for different treatments ranked as  $T1>T3>T2>CK$ . In summary, straw returning increased the antioxidant enzyme activity and the content of osmotic regulatory substances in wheat at the regreening stage, enhancing its cold resistance, which in turn promoted the development of wheat spikes and the accumulation of plant dry matter under freezing stress in early spring. Moreover, the full pulverization and surface coverage of wheat straw was proved to be the most effective treatment.

**Keywords:** Wheat; Straw returning modes; Young spike development; Dry matter accumulation; Antioxidant enzyme activity

小麦是全球最重要的粮食作物之一。黄淮海区是中国最大的小麦主产区,其小麦种植面积约  $1.53\times 10^7\text{ hm}^2$ ,该区小麦生产在保障国家粮食安全方面占据重要地位<sup>[1-3]</sup>。温度是小麦生长发育过程中最重要的生态因素之一<sup>[4]</sup>。近年来,气候变化导致中国黄淮海区低温灾害频发<sup>[5-6]</sup>,尤其是冬小麦越冬前或返青期后霜冻害,对小麦生长、分蘖发生、幼穗发育等方面产生不利影响,最终导致产量下降<sup>[7-9]</sup>。因此,加强黄淮海区低温灾害预防和灾后补救措施的研究对该地区冬小麦生产可持续发展意义重大。

砂姜黑土是安徽淮北平原的主要土壤类型,具有“僵、板、黏、闭”等不良理化特性及较低的土壤有机碳含量和较高的容重,严重制约该地区小麦的高产稳产<sup>[10-11]</sup>。研究表明,秸秆还田可显著改善土壤团聚体结构,增强土壤养分保持能

力<sup>[12]</sup>,增加土壤有机碳含量及养分库储量,不仅可提高砂姜黑土的耕地质量<sup>[13]</sup>,还能有效利用秸秆资源<sup>[14]</sup>。长期秸秆还田不仅能增进砂姜黑土的土壤地力<sup>[15]</sup>,也能提高小麦冬前幼苗质量<sup>[16-20]</sup>。玉米秸秆还田能够增强小麦幼苗体内的抗氧化能力及抗逆性能<sup>[17]</sup>;稻秸翻埋还田能够提高在低温胁迫下小麦幼苗的生理活性,增强抗寒能力<sup>[18]</sup>。长期秸秆还田可促进小麦幼苗的生长。秸秆还田后六叶期小麦干物质增加 31.58%~50.00%<sup>[19]</sup>;单季小麦秸秆还田可显著促进越冬期小麦根系伸长和干重增加<sup>[20]</sup>。目前,有关秸秆还田对小麦幼苗生理和干物质积累影响的研究较多,但针对长期不同秸秆还田模式对砂姜黑土区早春受冻小麦生长和生理活性的影响却鲜有报道。本研究基于农业农村部华东地区作物栽培科学观测站 15 年的长期定位试验,分析不同秸秆还

田模式对早春受冻下小麦叶片与根系中抗氧化酶活性、渗透调节物质含量及幼穗发育、地下及地上部干物质积累的影响,以期对砂姜黑土区小麦早春冻害预防和灾后调节措施的制定提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

于2008年6月在安徽省亳州市蒙城县农业科技示范场(33°9'44"N,116°32'56"E,海拔28 m)设立长期定位试验,供试土壤类型为砂姜黑土。2008年试验开始时0~20 cm土层有机质含量12.46 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量0.99 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮含量0.080 2 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷含量0.015 4 g·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量0.100 3 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

供试小麦品种为烟农19。采用小麦-玉米周年轮作模式。所施肥料为复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15)和尿素[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 46.4%]。小麦季共施纯N 240 kg·hm<sup>-2</sup>,55%基施,45%于拔

节期追施;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O施用量均为90.0 kg·hm<sup>-2</sup>,全部基施。2008年开始试验,设置小麦秸秆全量粉碎覆盖还田+玉米秸秆不还田(T1)、小麦秸秆全量粉碎覆盖还田+玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T2)、小麦秸秆不还田+玉米秸秆全量粉碎翻埋还田(T3)和小麦秸秆不还田+玉米秸秆不还田(CK)共4种不同的秸秆还田模式,秸秆不还田时小区作物秸秆人工整株移除,小麦秸秆和玉米秸秆的还田量分别为1.008 kg·m<sup>-2</sup>和1.041 kg·m<sup>-2</sup>。还田处理的秸秆均来自于对应小区的上茬作物全部秸秆。试验小区面积为43.20 m<sup>2</sup>(8.0 m×5.4 m),3次重复。本研究数据来源于2023—2024年小麦生长季,该季小麦于2023年10月17日机械播种,播种量为187.5 kg·hm<sup>-2</sup>。田间管理措施与其他高产田一致。在小麦三叶期(2023年11月12日)每处理挂牌标记100个主茎。2024年2月19日—2024年2月21日期间,小麦处于返青期,试验地区平均气温从15℃骤降至-3℃,发生了早春冻害<sup>[9]</sup>,期间具体气温变化见图1。

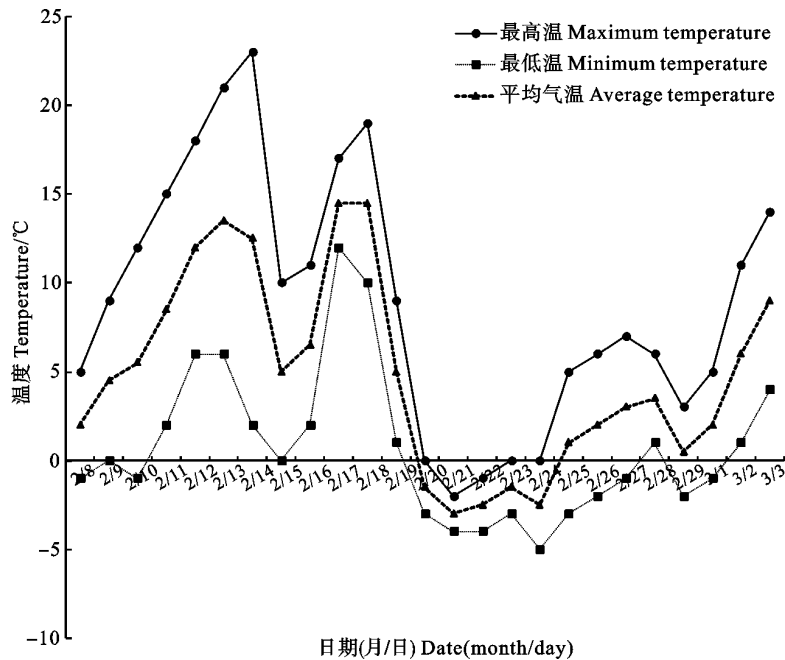


图1 试验地区温度日变化

Fig. 1 Diurnal variation of temperature in the test area

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 幼穗观察和干物质重的测定

于2024年2月19日和2024年3月2日各小区取各30株长势基本一致的小麦,使用体视显微镜(SMZ171,中国)观察冻害前后主茎幼穗发育情况,并将小麦分为地上部和根系,于105℃杀青30

min后80℃烘至恒重,使用天平称重,根冠比=根系干重/地上部干重。

#### 1.3.2 生理活性指标的测定

于2024年2月23日在各小区选15株长势基本一致的小麦,取其最上一片完展叶,同时用人工挖掘柱形土柱法(20 cm×20 cm×30 cm)进行

根系采样<sup>[21]</sup>。将样品置于液氮中速冻,于-80℃冰箱保存。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定,过氧化物酶(POD)活性通过愈创木酚法测定,过氧化氢酶(CAT)活性使用过氧化氢法测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定<sup>[22]</sup>。可溶性蛋白采用考马斯亮蓝结合法测定,脯氨酸(Pro)采用磺基水杨酸法测定<sup>[23]</sup>。每处理 3 次重复。

#### 1.4 数据分析

使用 Excel 2016 整理数据,用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析和主成分分析,采用 Duncan 氏新复极差法进行处理间多重比较分析( $\alpha=0.05$ ),使用 Excel 2016 和 Photoshop 2021 进行作图。

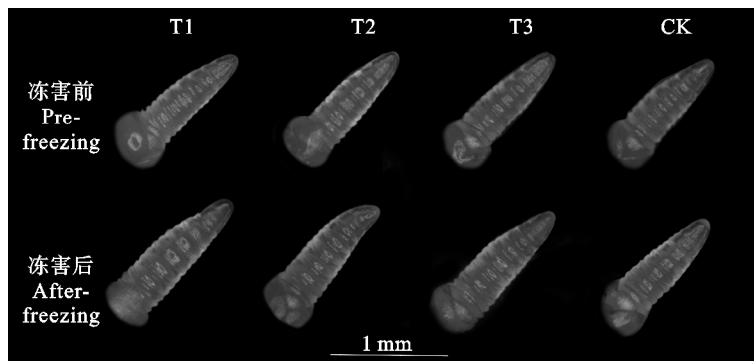


图 2 不同秸秆还田模式下小麦幼穗对早春冻害的响应

Fig. 2 Response of wheat young spike to freezing stress in early spring under different straw returning modes

表 1 不同秸秆还田模式下早春受冻小麦幼穗发育情况

Table 1 Wheat spike morphology under freezing stress in early spring under different straw returning modes

处理 Treatment	穗长 Spike length/mm		伸长速率 Extension rate/ (mm · d <sup>-1</sup> )
	冻害前 Pre-freezing	冻害后 After-freezing	
T1	1.36 ± 0.03a	1.58 ± 0.02a	0.020a
T2	1.33 ± 0.01a	1.55 ± 0.02a	0.020a
T3	1.33 ± 0.04a	1.58 ± 0.01a	0.023a
CK	1.35 ± 0.01a	1.51 ± 0.01b	0.014b

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。下同。

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

#### 2.2 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦干物质积累的影响

冻害发生前不同处理间小麦地上部干物质积累量差异不显著;冻害发生后,T1 和 T3 处理的地上部干物质积累量较 CK 分别提高了 15.14%

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦幼穗发育的影响

冻害发生前,不同处理间小麦穗长差异不显著(表 1),各幼穗所处阶段均为二棱期(图 2)。冻害发生后,与 CK 相比,T1、T2 和 T3 处理的穗长均显著提高,增幅分别为 4.57%、3.03%和 4.95%,表明秸秆还田缓解了早春低温对小麦幼穗发育的损伤。通过冻害发生前后对比,各处理幼穗均有所增长,T1、T2 和 T3 处理的幼穗伸长速率较 CK 分别提高了 36.19%、40.38%和 60.67%,进一步说明所有秸秆还田模式均可有效提升冻害条件下小麦幼穗的生长活力。

和 19.12%,差异均显著(表 2)。冻害发生前 T1 处理的根系干物质积累量显著高于 CK,T2 和 T3 处理与 CK 差异不显著;冻害发生后各秸秆还田处理的根系干物质积累量均高于 CK,其中 T1 和 T3 处理与 CK 差异显著,增幅分别为 13.05%和 10.26%。除 T2 处理的地上部外,其他处理地上部和根系干物质积累速率均显著高于 CK,其中 T1 和 T3 处理的地上部干物质积累速率分别提高了 116.46%和 123.95%,T1、T2、T3 处理的根系干物质积累速率分别提高了 43.50%、61.21%和 44.19%。这表明,不同秸秆还田模式均能促进早春受冻下小麦干物质的累积,其中 T1 和 T3 处理效果最佳。

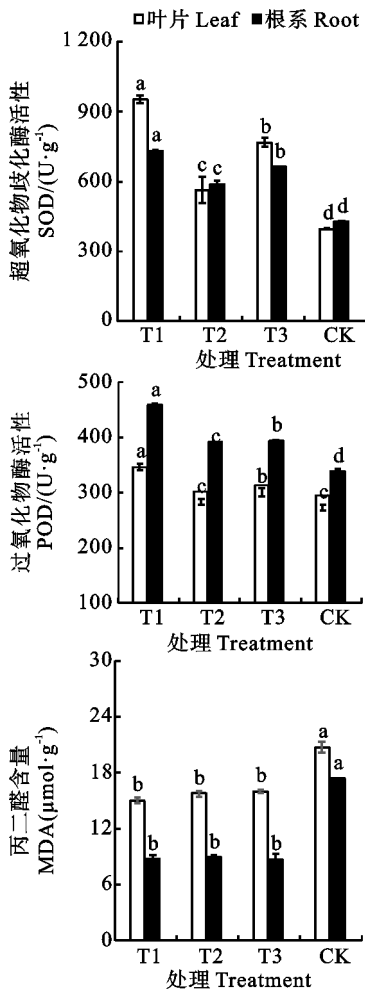
### 2.3 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

与 CK 相比,除 T2 处理叶片 POD 活性外,各秸秆还田处理的叶片和根系 SOD、POD 活性均显著提高,MDA 含量均降低(图 3)。其中,T1、T2

表 2 不同秸秆还田下早春受冻小麦干物质积累情况

Table 2 Dry matter accumulation in wheat of freezing stress in early spring under different straw returning

处理 Treatment	干物质积累量 Dry matter accumulation/(g · plant <sup>-1</sup> )				积累速率 Accumulation rate/ (g · d <sup>-1</sup> )		根冠比 Root-shoot ratio	
	冻害前 Pre-freezing		冻害后 After-freezing		地上部 Shoot	根系 Root	冻害前 Pre-freezing	冻害后 After-freezing
	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root				
T1	0.89a	0.58a	1.17a	0.72a	0.025a	0.013a	0.65a	0.61a
T2	0.92a	0.52c	1.14ab	0.67ab	0.021a	0.014a	0.57a	0.59a
T3	0.92a	0.56ab	1.21a	0.70a	0.026a	0.013a	0.61a	0.58a
CK	0.89a	0.54bc	1.01b	0.63b	0.012b	0.009b	0.61a	0.62a



图柱上不同字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Different letters above the columns indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ). The same in figure 4.

图 3 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦 SOD、POD 和 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of different straw returning modes on SOD, POD and MDA contents in wheat under freezing stress in early spring

和 T3 处理叶片 SOD 活性增幅分别为 140.08%、41.89% 和 93.31%，根系 SOD 活性增幅分别为 71.47%、38.05% 和 54.97%；T1 和 T3 处理叶片

POD 活性分别提高 26.69% 和 10.05%，T1、T2 和 T3 处理根系 POD 活性分别显著提高 35.60%、10.34% 和 16.54%；T1、T2 和 T3 处理叶片 MDA 含量分别下降 37.87%、31.45% 和 29.70%，根系 MDA 含量分别下降 99.57%、94.63% 和 100.63%。这说明不同秸秆还田模式均能增强早春冻害下小麦体内抗氧化能力，有效缓解了早春冻害对小麦的损伤，其中 T1 效果最佳。

#### 2.4 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦渗透调节物质的影响

植物受到胁迫后会产生大量渗透调节物质来增强细胞渗透势，以此来提高其抗逆能力。不同处理间小麦叶片和根系可溶性蛋白含量总体上表现为 T1 > T3 > T2 > CK (图 4)，除 T2 处理的根系外，各秸秆还田处理的可溶性蛋白含量与 CK 差异显著。其中，T1、T2 和 T3 处理叶片可溶性蛋白含量增幅分别为 40.55%、16.58% 和 32.99%，T1、T3 处理根系可溶性蛋白含量增幅分别为 64.44% 和 46.67%。与 CK 相比，T1 处理的叶片脯氨酸含量显著提高，增幅 55.11%；T1 和 T2 处理的根系脯氨酸含量显著提高，增幅分别为 83.71% 和 66.17%。这说明秸秆还田有利于早春冻害后小麦叶片和根系可溶性蛋白和脯氨酸积累，有助于提高抗冻性。

#### 2.5 综合评价

通过皮尔逊相关性分析，冬小麦不同指标间均存在一定的相关性 (图 5)，说明指标之间反映小麦生长发育及生理特征的信息存在不同程度的重叠，因此有必要采用主成分分析进行综合评价。

通过对以上指标进行主成分分析，基于主因子特征值大于 1 的原则，提取出 2 个主成分因子，累计方差贡献率达 90.682% (表 3)，说明这两个主成分因子能够解释 10 个单项指标的绝大部分

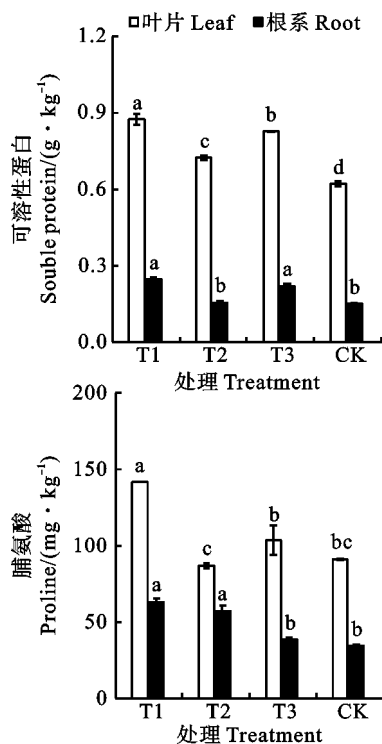
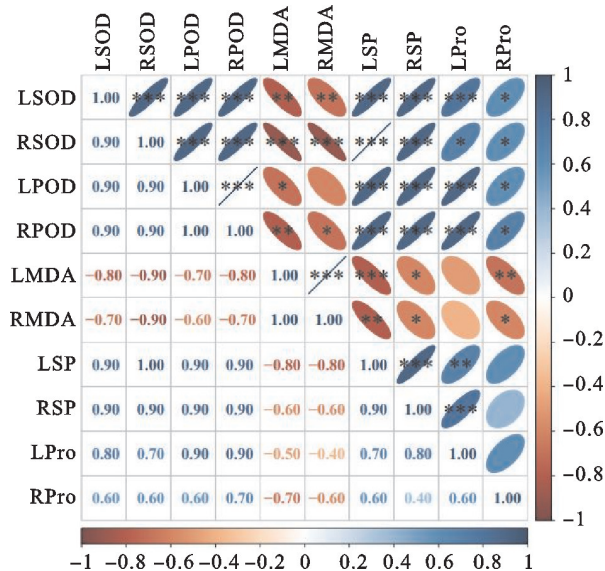


图 4 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响

Fig. 4 Effects of different straw returning modes on soluble protein and proline contents in wheat under freezing stress in early spring



LSOD: 叶片 SOD 活性; RSOD: 根系 SOD 活性; LPOD: 叶片 POD 活性; RPOD: 根系 POD 活性; LMDA: 叶片 MDA 含量; RMDA: 根系 MDA 含量; LSP: 叶片可溶性蛋白含量; RSP: 根系可溶性蛋白含量; LPro: 叶片脯氨酸含量; RPro: 根系脯氨酸含量。表 3 同。\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ 。

LSOD: Leaf SOD activity; RSOD: Root SOD activity; LPOD: Leaf POD activity; RPOD: Root POD activity; LMDA: MDA content in leaves; RMDA: MDA content in roots; LSP: Soluble protein content of leaves; RSP: Soluble protein content of root; LPro: Leaf proline content; RPro: Root proline content. The same in table 3. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ .

图 5 不同秸秆还田模式下小麦各生理指标的相关性  
Fig. 5 Correlation of different physiological indices of wheat under different straw returning modes

信息。其中,第 1 主成分的方差贡献率为 79.922%, 主要反映了 LSOD、LPOD、RPOD、LPro、RSP 等 7 个变量的信息;第 2 主成分的方差贡献率为 10.760%, 主要反映了 LMDA、RMDA、RPro 等 7 个变量的信息(表 3)。

利用主成分旋转后的成分矩阵即系数矩阵及各指标的隶属函数值,求得 2 个主成分因子( $F_1$ 、 $F_2$ )值,再根据各主成分的权重,对主成分得分加权求和得出综合评价值( $D$ )。不同处理的  $D$  值大小表现为  $T1 > T3 > T2 > CK$ (表 4),说明 3 种秸秆还田模式均可提高小麦对早春冻害的抗寒能力,其中以 T1 处理效果最佳。

$$F_1 = 0.805X_1 + 0.644X_2 + 0.889X_3 + 0.823X_4 - 0.335X_5 - 0.267X_6 + 0.718X_7 + 0.886X_8 + 0.939X_9 + 0.310X_{10}$$

$$F_2 = 0.557X_1 + 0.741X_2 + 0.393X_3 + 0.543X_4 - 0.929X_5 - 0.930X_6 + 0.633X_7 + 0.333X_8 + 0.192X_9 + 0.702X_{10}$$

$$D = 0.881F_1 + 0.119F_2。$$

表 3 主成分旋转后成分矩阵、初始特征值和贡献率  
Table 3 Rotational component matrix, initial eigenvalue and contribution rate of principal component analysis

指标 Indicator	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2
LSOD( $X_1$ )	0.805	0.557
RSOD( $X_2$ )	0.644	0.741
LPOD( $X_3$ )	0.889	0.393
RPOD( $X_4$ )	0.823	0.543
LMDA( $X_5$ )	-0.335	-0.929
RMDA( $X_6$ )	-0.267	-0.930
LSP( $X_7$ )	0.718	0.633
RSP( $X_8$ )	0.886	0.333
LPro( $X_9$ )	0.939	0.192
RPro( $X_{10}$ )	0.310	0.702
特征值 Eigenvalue	7.922	1.076
方差贡献率 Variance contribution rate/%	79.922	10.760
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	79.922	90.682

表 4 主成分得分、综合得分及排序

Table 4 Principal component score, composite score and ranking

处理 Treatment	$F_1$	$F_2$	$D$	排序 Ranking
T1	5.107	2.137	4.754	1
T2	1.176	0.039	1.041	3
T3	2.713	0.607	2.463	2
CK	0.313	0.037	0.280	4

### 3 讨论

#### 3.1 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦叶片和根系生理活性的影响

玉米秸秆还田能够提高小麦幼苗体内的 SOD 活性<sup>[17]</sup>, 稻秸翻埋还田在低温胁迫下对小麦幼苗各项生理指标均无负面影响, 且能提高小麦苗期的抗寒能力<sup>[18]</sup>。本研究与上述研究结果一致。早春受冻后, 不同秸秆还田模式下小麦叶片 SOD 和 POD 活性均显著高于未还田处理。此外, 秸秆还田处理显著提高了根系抗氧化酶活性及可溶性蛋白和脯氨酸含量, 降低了 MDA 含量。这可能是由于长期秸秆还田改善了根际土壤的孔隙结构和养分环境<sup>[11]</sup>, 促进根部可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸等物质积累, 提高了细胞膜的稳定性。吴宇等<sup>[20]</sup>研究发现, 长期秸秆还田可提高越冬期小麦根系分泌物中部分糖类、氨基酸和有机酸类物质相对含量, 从而使幼苗根系维持较高的根系活力。因此, 长期秸秆还田通过提高小麦叶片与根系的活性氧代谢和渗透调节物质的合成能力, 缓解了早春冻害所造成的损伤, 从而增强小麦抗寒能力。此外, 由于是大田早春冻害, 本研究未取样测定低温前后的小麦 ROS 代谢相关酶和渗透调节物质含量以形成动态的生理活性变化, 后续还需进一步深入探究。

#### 3.2 不同秸秆还田模式对早春受冻下小麦幼穗发育和干物质积累量的影响

干物质积累对作物产量形成至关重要, 其积累和转运特性与产量的提高密切相关<sup>[25]</sup>。本研究发现, 秸秆还田显著提升了小麦在冻害条件下地上部与根系干物质的积累, 与团队前期关于秸秆全量还田促进冬前干物质积累、提升群体质量的研究结果一致<sup>[19]</sup>。秸秆还田可能通过减少土壤水分蒸发, 调节分蘖节微环境温度, 缓解低温对作物生长的影响, 从而促进分蘖发生<sup>[26-27]</sup>。小麦返青期作为分化有效分蘖的关键时期<sup>[7]</sup>, 保障该时期受冻小麦幼穗的正常发育, 提高其干物质积累、分配和转运对小麦抗冻能力与后期产量具有重要的作用。本研究中, 长期不同秸秆还田模式均可显著提高早春受冻下小麦地上、地下部干物质积累量, 这与前人的研究结果基本一致<sup>[18-19]</sup>。这可能是因为长期秸秆还田提高了土壤有机碳含量、速效养分含量和蓄水能力<sup>[11-12, 28]</sup>, 改善了小

麦根际环境, 同时增强了小麦的根系对水分和养分的吸收能力<sup>[20]</sup>, 最终促进了干物质积累、转运与分配, 有利于小麦幼穗生长发育。此外, 还田处理协调了冻害下小麦根冠比, 减少了根系的冗余生长, 有利于更多干物质向地上部分分配, 从而提升增产潜力<sup>[29-30]</sup>。后续可进一步通过<sup>13</sup>C、<sup>15</sup>N 同位素标记的方式, 从碳氮循环的角度出发, 深入探究长期秸秆还田如何改善土壤养分环境, 促进速效养分的释放。

#### 3.3 综合评价

作物的抗逆性是一个受多种因素影响的复杂数量性状, 因而单一的指标难以全面准确地反映作物的抗逆性, 需综合多种指标来评价作物对逆境的适应能力<sup>[31]</sup>。张自阳等<sup>[32]</sup>研究表明, 低温胁迫下小麦穗粒数与 POD 活性呈极显著正相关, 与 SOD 活性呈显著正相关, 与 MDA 含量呈极显著负相关。主成分分析是一种较客观准确的多元统计分析方法<sup>[33]</sup>。主成分分析可以将原来个数较多的指标转换为新的个数较少且彼此独立的综合指标, 同时根据各自贡献率的大小可以知道各综合指标的相对重要性<sup>[34]</sup>。王洋洋等<sup>[31]</sup>基于主成分分析和聚类分析准确评价了不同水分处理下冬小麦对晚霜冻害的抗性。本研究对不同处理下小麦的 10 个与低温胁迫有关的生理指标进行主成分分析, 提取出了 2 个主成分, 反映了所有指标 90.682% 的信息, 主成分 1 中渗透调节物质的特征值较大, 主成分 2 中 MDA 含量的特征值较大, 说明本研究中小麦主要是通过增加植株内渗透调节物质的含量, 减轻细胞膜质过氧化作用, 从而来提高小麦的抗寒性。D 值能系统评价不同处理下小麦花后地上部与根系生理活性大小。本研究中, 不同秸秆还田处理的排序均高于秸秆不还田处理, 说明不同秸秆还田模式均提高了小麦的抗寒性。不同秸秆还田处理抗寒性大小依次为 T1>T3>T2, 表明小麦秸秆全量粉碎覆盖还田处理对小麦的抗寒性提升幅度最大。

### 4 结论

不同秸秆还田模式均显著提高了早春冻害下小麦叶片和根系的抗氧化酶活性, 降低了 MDA 含量, 增加可溶性蛋白和脯氨酸等渗透调节物质的含量, 从而增强其抗寒性。秸秆还田提高了早春受冻下小麦地上部和根系的干物质积累量。通过相关性分析和主成分分析发现, 不同处理的小

麦叶片和根系的各项生理活性互相联系,抗寒性大小依次为 T1>T3>T2>CK,以小麦秸秆全量粉碎覆盖还田处理效果最佳。

#### 参考文献:

- [1]FAO. Food and agriculture organization of the united nations [EB/OL]. 2022. <https://www.fao.org/statistics/en/>.
- [2]茹振钢,冯素伟,李 涂. 黄淮麦区小麦品种的高产潜力与实现途径[J]. 中国农业科学,2015,48(17):3388.  
RU Z G, FENG S W, LI G. High-yield potential and effective ways of wheat in Yellow & Huai River valley facultative winter wheat region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (17):3388.
- [3]关浩杰,司喜梅. 黄淮海平原粮食生产空间格局演化及其影响因素[J]. 中国农业资源与区划,2024,45(8):31.  
GUAN H J, SI X M. Evolution and influence factors of the spatial pattern of grain production in the Huang-Huai-Hai plain [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(8):31.
- [4]CHEN Z, GALLI M, GALLAVOTTI A. Mechanisms of temperature-regulated growth and thermotolerance in crop species [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2022, 65:102134.
- [5]MASSON-DELMOTTE V, PANMAO Z, PORTNER H O, *et al.* Global warming of 1.5 °C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [6]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.
- [7]胡立勇, 丁艳锋. 作物栽培学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.  
HU L Y, DING Y F. Crop cultivation science [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- [8]刘 盼, 高 珊, 李浩宇, 等. 缩行匀株对小麦分蘖的影响及其生理机制[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(4):32.  
LIU P, GAO S, LI H Y, *et al.* Effects of row space reduction and plant space expansion on tillers number in wheat and its physiological mechanism [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(4):32.
- [9]霍治国, 李美萱, 张海燕, 等. 中国冬小麦霜冻灾害研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(6):16.  
HUO Z G, LI M X, ZHANG H Y, *et al.* Review on frost damage of winter wheat in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(6):16.
- [10]陈 欢, 曹承富, 孔令聪, 等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2014, 47(13):2580.  
CHEN H, CAO C F, KONG L C, *et al.* Study on wheat yield stability in Huaihei lime concretion black soil area based on long-term fertilization experiment [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(13):2580.
- [11]丁天宇, 郭自春, 钱泳其, 等. 秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16):71.  
DING T Y, GUO Z C, QIAN Y Q, *et al.* Effects of straw return methods on the soil organic carbon fractions and pore structure characteristics of Shajiang black soil (Vertisol) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16):71.
- [12]何家帅, 李新美, 魏跃鹏, 等. 长期深耕秸秆还田配施生物炭对砂姜黑土团聚体及小麦-玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7):161.  
HE J S, LI X M, WEI Y P, *et al.* Effects of long-term deep tillage and straw return with biochar addition to lime concretion black soil on the aggregates and wheat-maize yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(7):161.
- [13]KARAMI A, HOMAEE M, AFZALINIA S, *et al.* Organic resource management: Impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148:22.
- [14]农业农村部. 全国农作物秸秆综合利用情况报告[EB/QL]. 2022. [http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010\\_6412962.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010_6412962.htm).  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. National report on comprehensive utilization of crop straw [EB/QL]. 2022. [http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010\\_6412962.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010_6412962.htm).
- [15]HUANG S, ZENG Y, WU J, *et al.* Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2013, 154:188.
- [16]张 蓁, 杭雅文, 李福建, 等. 稻秸还田年数和氮肥运筹对小麦出苗和幼苗形态及生理特性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(8):1805.  
ZHANG C X, HANG Y W, LI F J, *et al.* Effects of rice straw returning and nitrogen fertilizer on seedling emergence and morphological and physiological characteristics of wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(8):1805.
- [17]陈小文, 祁 鑫, 王海永, 等. Bt 玉米秸秆还田对小麦幼苗生长发育的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(3):993.  
CHEN X W, QI X, WANG H Y, *et al.* Effects of maize straw with Bt gene return to field on growth of wheat seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3):993.
- [18]薛亚光, 石 吕, 魏亚凤, 等. 稻秸全量还田方式下小麦苗期低温的生理响应及其抗寒性分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(9):1722.  
XUE Y G, SHI L, WEI Y F, *et al.* Physiological responses of wheat under different all rice straw returning patterns to low temperature at seedling stage and cold resistance analysis [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(9):1722.

- [19]蔡洪梅,吴宇,于敏,等.长期秸秆全量还田对砂姜黑土区冬小麦幼苗生长质量的影响[J].麦类作物学报,2022,42(10):1266.  
CAI H M, WU Y, YU M, *et al.* Effects of long-term straw returning to field on seedling growth quality of winter wheat in lime concretion black soil area [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(10):1266.
- [20]吴宇,蔡洪梅,许波,等.不同季秸秆全量还田对小麦根系分泌物的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(12):1938.  
WU Y, CAI H M, XU B, *et al.* Effects of all straw return on root secretions of wheat in different seasons [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(12):1938.
- [21]王丽芳,康娟,马耕,等.农田施氮对冬小麦产量、根-冠氮素积累及其利用效率的影响[J].麦类作物学报,2021,41(11):1403.  
WANG L F, KANG J, MA G, *et al.* Effect of nitrogen application on yield, nitrogen accumulation and use efficiency in root-shoot of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(11):1403.
- [22]宗学凤,王三根.植物生理研究技术[M].2版.重庆:西南师范大学出版社,2021.  
ZONG X F, WANG S G. *Plant physiology research techniques* [M]. 2nd ed. Chongqing: Southwest University Press, 2021.
- [23]王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].3版.北京:高等教育出版社,2015.  
WANG X K, HUANG J L. *Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiment* [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [24]张龙龙,杨明明,董剑,等.三个小麦新品种不同生育阶段抗旱性的综合评价[J].麦类作物学报,2016,36(4):426.  
ZHANG L L, YANG M M, DONG J, *et al.* Comprehensive analysis of drought resistance of three new wheat cultivars at different growth stages [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(4):426.
- [25]曹议丹,钱麟君,霍俊豪,等.优化管理对小麦-玉米轮作系统植株干物质积累、转运与产量的影响[J].山东农业科学,2024,56(5):59.  
CAO Y D, QIAN L J, HUO J H, *et al.* Effects of optimized managements on accumulation and translocation of dry matter and crop yield in wheat-maize rotation system [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(5):59.
- [26]李朝苏,汤永禄,吴春,等.稻草还田方式及还田量对稻茬小麦播种立苗质量和产量建成的影响[J].西南农业学报,2014,27(3):996.  
LI C S, TANG Y L, WU C, *et al.* Effect of rice straw returning pattern and mulching amount on mechanical sowing quality and yield formation of wheat [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(3):996.
- [27]杨滨娟,钱海燕,黄国勤,等.秸秆还田及其研究进展[J].农学学报,2012,2(5):1.  
YANG B J, QIAN H Y, HUANG G Q, *et al.* Research progress and rice-straw returning [J]. *Journal of Agriculture*, 2012, 2(5):1.
- [28]唐志伟,翁颖,朱夏童,等.秸秆还田下中国农田土壤微生物生物量碳变化及其影响因素的Meta分析[J].生态环境学报,2023,32(9):1552.  
TANG Z W, WENG Y, ZHU X T, *et al.* Meta-analysis of soil microbial mass carbon and its influencing factors in farmland in China under straw return [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2023, 32(9):1552.
- [29]王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等.水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J].中国生态农业学报,2013,21(3):282.  
WANG Y Z, LIU X W, SUN H Y, *et al.* Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3):282.
- [30]王宁,冯克云,南宏宇,等.不同水分条件下有机无机肥配施对棉花根系特征及产量的影响[J].中国农业科学,2022,55(11):2187.  
WANG N, FENG K Y, NAN H Y, *et al.* Effects of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer on root characteristics and yield of cotton under different water conditions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(11):2187.
- [31]王洋洋,贺利,任德超,等.基于主成分-聚类分析的不同水分冬小麦晚霜冻害评价[J].作物学报,2022,48(2):448.  
WANG Y Y, HE L, REN D C, *et al.* Evaluations of winter wheat late frost damage under different water based on principal component-cluster analysis [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2):448.
- [32]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.  
ZHANG Z Y, WANG Z Y, WANG B, *et al.* Effects of low temperature treatment at spring spike differentiation stage on young ear fruiting and physiological characteristics of different wheat varieties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(4):130.
- [33]李霞,孙志伟,吕川根,等.田间杂交水稻单年单点5种不同逆境的批量筛选及聚类分析[J].中国生态农业学报,2010,18(3):528.  
LI X, SUN Z W, LU C G, *et al.* Mass screening and cluster analysis for tolerance to stress of hybrid rice variety under field conditions [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3):528.
- [34]王树刚,王振林,王平,等.不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J].生态学报,2011,31(4):1064.  
WANG S G, WANG Z L, WANG P, *et al.* Evaluation of wheat freezing resistance based on the responses of the physiological indices to low temperature stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4):1064.