

网络出版时间:2025-06-04

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20250604.0908.002

喷施硫肥对强筋小麦 GMP 粒度分布特征和品质的影响

马智健¹, 柳明阳¹, 张志雯², 张灵鑫¹, 王曜阔¹, 闫彦菲¹,
张敏¹, 袁智³, 杨敏¹, 李昊昱¹, 蔡瑞国¹

(1. 河北省作物逆境生物学重点实验室/河北科技师范学院农学与生物科技学院, 河北昌黎 066600;

2. 河北科技师范学院后勤与国有资产管理处, 河北秦皇岛, 066004; 3. 河北省昌黎县农业农村局, 河北昌黎 066600)

摘要:为明确花后喷施硫肥对冀东地区强筋小麦谷蛋白大聚合物(GMP)形成和面粉加工品质的影响,以强筋小麦品种中麦 886 和津农 7 号为供试材料,分析了花后喷施甲硫氨酸(Met)和硫酸铵(S)后强筋小麦籽粒产量、蛋白质含量、GMP 含量及其粒度分布和面粉加工品质的变化。结果表明,与喷施等氮的尿素水溶液(CK)相比,喷施 Met 和 S 后,中麦 886 的籽粒蛋白质含量分别提升 0.63 和 0.25 个百分点,津农 7 号的籽粒蛋白质含量分别提高 0.64 和 0.27 个百分点;在 Met 和 S 处理下中麦 886 籽粒 GMP 含量较 CK 分别增加 0.37 和 0.15 个百分点,津农 7 号则分别增加 0.48 和 0.18 个百分点。然而, Met 处理导致中麦 886 和津农 7 号产量分别下降 2.5% 和 1.9%, S 处理则使两个品种的产量下降 8.6% 和 9.2%。花后喷施硫肥促进强筋小麦籽粒中大粒径 GMP 颗粒的体积、表面积和数目比例的提高。Met 处理显著提高强筋小麦蛋白质中高分子量谷蛋白亚基、二硫键和游离巯基的含量; S 处理主要增加低分子量谷蛋白亚基、二硫键与游离巯基含量。Met 处理可全面优化强筋小麦面团流变学特性, S 处理仅对中麦 886 湿面筋含量和津农 7 号吸水量有提升作用。综上,花后喷施硫肥虽会导致强筋小麦轻微减产,但通过调控谷蛋白聚合组成明显改善加工品质,其中喷施 Met 的效果更好。

关键词: 强筋小麦; 喷施硫肥; 谷蛋白大聚合物(GMP); 品质

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)01-0114-09

Effects of Spraying Sulfur Fertilizer on GMP Particle Size Distribution Characteristics and Quality of Strong-Gluten Wheat

MA Zhijian¹, LIU Mingyang¹, ZHANG Zhiwen², ZHANG Lingxin¹, WANG Yaokuo¹,
YAN Yanfei¹, ZHANG Min¹, YUAN Zhi³, YANG Min¹, LI Haoyu¹, CAI Ruiguo¹

(1. Hebei Key Laboratory of Crop Stress Biology College of Agronomy and Biotechnology/ Hebei Normal University of Science and Technology, Changli, Hebei 066600, China; 2. Department of Logistics and State-Owned Assets/ Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 3. Management Changli County Agricultural and Rural Bureau, Changli, Hebei 066600, China)

Abstract: In order to clarify the effects of post-flowering spraying of sulfur fertilizer on the formation of glutenin macro-polymer(GMP) and flour milling quality of strong-gluten wheat in Eastern of Hebei Province, the strong-gluten wheat varieties Zhongmai 886 and Jinnong 7 were selected in the present study, and the treatments of spraying of water(CK) and spraying of methanethionine(Met) and ammonium sulfate(S) were set up to analyze the changes of grain yield, protein content, GMP content and grain size distribution, and flour milling quality of strong-gluten wheat after post-flowering spraying of Met and ammonium sulfate(S). The results showed that compared with CK, the protein con-

收稿日期: 2025-01-07

修回日期: 2025-03-15

基金项目: 河北省自然科学基金项目(C2022407015); 秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目(202002B007)

第一作者 E-mail: mazhijianMZJ@126.com(马智健); liumingyang0601@126.com(柳明阳)

通讯作者 E-mail: cairuiguo@126.com(蔡瑞国)

tent of Zhongmai 886 was enhanced by 0.63 and 0.25 percentage points, and that of Jinnong 7 was increased by 0.64 and 0.27 percentage points after spraying Met and S, respectively. The GMP content of Zhongmai 886 kernels was increased by 0.37 and 0.15 percentage points under Met and S treatments, respectively, while that of Jinnong 7 was increased by 0.48 and 0.18 percentage points, respectively. However, Met treatment resulted in a 2.5% and 1.9% decrease in yield for Zhongmai 886 and Jinnong 7, respectively, while S treatment reduced yield by 8.6% and 9.2%. Post-flowering spraying of sulfur fertilizer promoted the increase in the volume, surface area and number ratio of large-size GMP particles in strong-gluten wheat kernels. Met treatment significantly increased the content of high-molecular-weight glutenin subunits, disulfide bonds and free sulfhydryl groups in strong-gluten wheat proteins, while S treatment mainly increased the content of low-molecular-weight glutenin subunits, disulfide bonds and free sulfhydryl groups. Met treatment optimized the rheological properties of strong-gluten wheat doughs across the board, while S treatment enhanced only the wet gluten of Zhongmai 886 and the water absorption of Jinnong 7. In conclusion, the post-flowering spraying of sulfur fertilizer reduced the yield slightly, but it improved the processing quality by regulating the glutenin polymerization composition, in which the spraying of Met had a more prominent improvement effect.

Keywords: Strong-gluten wheat; Spraying sulphur fertilizer; Glutenin macro-polymer(GMP); Quality

小麦(*Triticum aestivum* L.)籽粒中蛋白质的含量及其组分是决定其品质的重要因素,其中谷蛋白作为一种贮藏蛋白,与面粉的粘弹性密切相关。谷蛋白大聚合物(GMP)作为谷蛋白中的一种重要组成部分,由高分子量谷蛋白亚基(HMW-GS)和低分子量谷蛋白亚基(LMW-GS)经二硫键(-S-S-)链接而成,影响面团流变学特性^[1]。硫是合成-S-S-的基本元素,也是小麦生长必需的矿质元素之一,其不但在合成叶绿素、谷胱甘肽等方面发挥作用,对半胱氨酸、甲硫氨酸(Met)等含硫氨基酸的合成与代谢也具有重要影响^[2],与此相关的蛋白质及其三级结构影响小麦面团的加工品质^[3]。

施硫能够提升小麦籽粒灌浆前期旗叶总的游离氨基酸含量,确保合成籽粒蛋白质所需底物的充足供应^[4]。硫肥的施用通过调控小麦籽粒中游离巯基(-SH)和-S-S-的含量来影响 GMP 的积累与粒度分布,进而调节小麦品质^[5-6]。喷施硫肥可以增加小麦籽粒-S-S-和-SH 含量,影响籽粒中半胱氨酸、Met 等含硫氨基酸的组成和含量,进而调控籽粒的蛋白质合成^[3]。刘志连等^[7]研究表明,开花期追施硫肥($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)可显著提高小麦灌浆后期籽粒的蛋白质含量,增加谷蛋白含量,有效改善小麦面团的流变学特性,增强面筋强度。在一定范围内基施硫肥可降低小麦湿面筋含量,促进籽粒蛋白质含量提高,增加籽粒中 GMP、-SH 以及-S-S-含量^[8-9]。增施硫肥可有效提高面粉沉降

值,增加面团形成和稳定时间^[10]。

目前关于硫肥施用量对小麦品质影响的研究已经取得了一些成果,但关于叶面施硫对氨基酸含量、蛋白质含量与组成、淀粉组分、面筋含量等参数调控作用的研究较多,而关于叶面施硫与 GMP 的含量及其分布特征和面团流变学特性关系的研究相对较少。本试验以强筋小麦品种中麦 886 和津农 7 号为材料,探究强筋小麦 GMP 含量及其颗粒分布特征对氨基酸肥 Met 和无机硫肥 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 的响应,以明确花后喷施硫肥对冀东地区强筋小麦谷蛋白大聚合物(GMP)形成和面粉加工品质的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 10 月至 2023 年 6 月,在河北省秦皇岛市昌黎县河北科技师范学院农学与生物科技学院基地进行(119.13°E , 39.44°N)。土壤类型为潮褐土,播种前 0~20 cm 土壤有机质、速效氮、全氮、速效磷、全磷、全钾、速效钾、有效硫和全硫含量分别为 $15.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $132.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $110.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $87.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $20.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $102.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。小麦生育期内的气温和降水情况见图 1。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主区为两个供试强筋小

麦品种(中麦 886 和津农 7 号),副区设置叶面喷施甲硫氨酸(Met)、硫酸铵(S)和尿素水溶液(CK)3 个水平。每种喷施处理利用尿素将叶面喷施氮量调整一致,具体喷施用量见表 1。小区面积 5 m²(2 m×2.5 m),3 次重复。按照试验设计要求,在花后 5~7 d、12~14 d、19~21 d 将氮硫总喷施量分 3 次等量喷施。试验地前茬玉米收获后深翻,小麦播前按照纯氮 120 kg·hm⁻² 的标准基施复合肥(N-P-K:15-15-15),拔节期追施纯氮 120 kg·hm⁻²(46% 尿素)。三叶期定苗至 600 万株·hm⁻²。除施肥外,其他管理措施同当地常规栽培。小麦于 2022 年 10 月 18 日播种,2023 年 6 月 22 日收获。

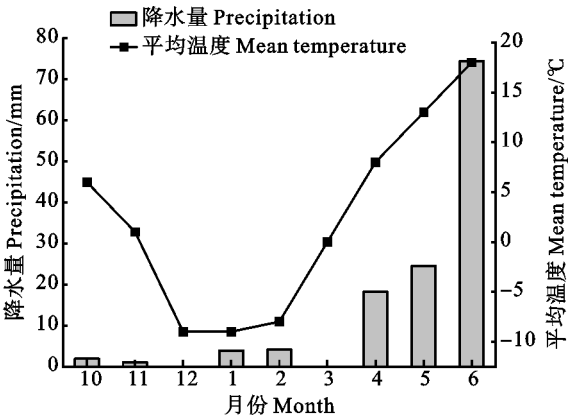


图 1 小麦生育季试验地的降水量和气温
Fig.1 Precipitation and air temperature of experimental field in wheat growing season

表 1 各叶面喷施处理的氮硫喷施量

Table 1 Sprayed amount of nitrogen and sulfur in each foliar spray treatments

处理 Treatment	试剂 Reagent	喷施量 Spraying amount/(kg·hm ⁻²)	纯硫 Sulfur/(kg·hm ⁻²)	纯氮 Nitrogen/(kg·hm ⁻²)
CK	尿素 Urea	—	0	4.37
Met	C ₅ H ₁₁ NO ₂ S	23.28	5.00	4.37
S	(NH ₄) ₂ SO ₄	20.63	5.00	4.37

1.3 测定项目与方法

1.3.1 小麦籽粒产量及其构成因素的测定

成熟期各小区取 1 m 双行小麦调查穗数;取连续的 20 个麦穗调查穗粒数;选择 1 m² 区域收获,籽粒晾晒至水分含量达到 13%,称重测定小麦籽粒实际产量;随机挑出 1 000 粒进行称重,测定千粒重。各指标测定均 3 次生物学重复。

1.3.2 小麦籽粒蛋白质及其组分含量的测定

在花后 5、10、15、20、25、30、35 d,每小区选取 30 个同一天开花期标记的单茎进行人工剥粒,105 ℃杀青 30 min,60 ℃烘干到恒重,用 PUL-VERISETTE 14 粉碎机(Fritsch,德国)磨粉。

蛋白质含量的测定采用凯氏定氮法,借助自动定氮仪来测定籽粒的含氮量,再将含氮量乘以 5.7 即为蛋白质含量^[11]。籽粒清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白均采用连续提取法,分别使用蒸馏水、10% NaCl 溶液、75% 乙醇和 0.2% NaOH 溶液震荡提取^[12],将提取液定容至 50 mL 后,通过考马斯亮蓝 G-250 方法测定其含量,3 次生物学重复。

1.3.3 小麦籽粒 GMP 含量及其粒度分布测定

参照 Weegels 等^[13] 和孙辉等^[14] 的方法,使用双缩脲法提取并测定 GMP 含量。GMP 粒度

分析则采用 Don 等^[15] 的方法提取 GMP 凝胶,再用 LSI3320 激光衍射粒度分析仪进行分析。

1.3.4 小麦籽粒 HMW-GS 含量测定

参照梁荣奇等^[16] 的方法提取 HMW-GS,通过 SDS-PAGE 电泳(DYY-22A 型电泳装置,北京六一仪器厂生产)、考马斯亮蓝 R250 染色、脱色和切胶,最后用分光光度计测定其含量。

1.3.5 -SH 和-S-S-含量测定

参照张来林^[17] 的方法,使用盐酸胍提取游离-SH、总-SH。-S-S-含量=(总-SH 含量-游离-SH 含量)/2。

1.3.6 面粉加工品质测定

每处理取后熟 60 d 的小麦成熟籽粒 2.0 kg,调整小麦籽粒含水量为 13%,用 PUL-VERISETTE14 粉碎机(Fritsch,德国)磨粉并过筛两次,用于沉淀值、湿面筋、粉质和拉伸参数的测定。使用德国 Brabender 公司的粉质仪和拉伸仪测量面粉的加工品质。粉质参数采用 JFZD 300A 型粉质仪按 AACC-54-21 方法测定;拉伸参数采用 JMLD150 型拉伸仪按 AACC-54-10 方法测定;湿面筋含量采用 JMG-Ⅲ型面筋测定仪按国标 GBT14608293 方法测定;沉淀值按照 GB5497-1985 的方法测定。

1.4 统计与分析

用 Excel 2016 整理数据,用 SPSS 26.0 进行方差分析和相关性分析,用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 喷施硫肥对强筋小麦产量及其构成因素的影响

与 CK 相比,喷施硫肥后中麦 886 和津农 7 号的产量均不同程度降低,其中 S 处理的产量与 CK 差异显著,两个品种分别减产 8.6%和 9.2%(表 2)。喷施 2 种硫肥对小麦穗粒数和穗数没有显著影响,但降低千粒重,其中 S 处理下中麦 886 和津农 7 号的千粒重降幅分别为 8.2%和 9.2%,与 CK 均差异显著。这说明花后喷施硫酸铵对小

麦产量产生一定的负效应,千粒重下降是其主因。

2.2 喷施硫肥对强筋小麦籽粒蛋白质及其组分含量的影响

与 CK 相比,喷施硫肥不同程度提升了中麦 886 和津农 7 号的蛋白质含量,其中 Met 处理下两个品种的蛋白质含量均显著增加,增幅分别为 0.63 和 0.64 个百分点,S 处理下仅中麦 886 的蛋白质含量变化显著(表 3)。两种硫肥处理下两个品种的球蛋白和醇溶蛋白含量与 CK 差异均不明显,谷蛋白含量均显著提高,中麦 886 的清蛋白含量均显著增加,而津农 7 号的清蛋白含量变化不明显。这说明喷施硫肥主要通过影响籽粒蛋白组分中清、谷蛋白含量,促进籽粒总蛋白含量提升。

表 2 不同处理下强筋小麦的产量及其构成因素

Table 2 Yield and its components of strong-gluten wheat under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-kernel weight/g	穗数 Spike number/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量 Grain yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
中麦 886 Zhongmai 886	CK	34.0a	41.5a	676.3a	10 002.9a
	Met	36.1a	40.5a	667.5a	9 757.3a
	S	33.8a	38.1b	637.4a	9 146.5b
津农 7 号 Jinnong 7	CK	30.7a	45.6a	682.5a	8 269.7a
	Met	31.7a	44.6a	636.9a	8 113.0a
	S	31.8a	41.4b	664.7a	7 505.8b

同一品种同一列数值后的不同字母表示的不同处理间在 0.05 水平上差异显著。下表同。
Different letters after the values of the same columns indicate significant differences among different treatments for the same varieties at 0.05 level. The same in tables 3—6.

表 3 不同处理下强筋小麦籽粒的蛋白质及其组分含量

Table 3 Protein and its components content in strong-gluten wheat grains under different treatments %

品种 Variety	处理 Treatment	清蛋白 Albumin	球蛋白 Globulin	醇溶蛋白 Gliadin	谷蛋白 Gluten	总蛋白 Total protein
中麦 886 Zhongmai 886	CK	2.06b	1.72a	4.10a	5.96b	14.90b
	Met	2.41a	1.59a	4.14a	6.16a	15.53a
	S	2.46a	1.60a	4.35a	6.15a	15.15a
津农 7 号 Jinnong 7	CK	2.29a	1.30a	3.85a	6.38b	14.63b
	Met	2.13a	1.29a	4.16a	6.80a	15.27a
	S	2.26a	1.36a	4.08a	6.76a	14.90b

2.3 喷施硫肥对强筋小麦 GMP 含量和粒度分布特征的影响

2.3.1 喷施硫肥对强筋小麦 GMP 含量的影响

与 CK 相比, Met 和 S 处理均显著提高中麦 886 和津农 7 号的籽粒 GMP 含量(图 2)。其中, Met 处理下中麦 886 和津农 7 号的籽粒 GMP 含量增幅分别为 0.37 和 0.48 个百分点, S 处理下增幅分别为 0.15 和 0.18 个百分点。这说明喷施

硫肥可促进小麦籽粒 GMP 的积累,且以喷施 Met 效果较好。

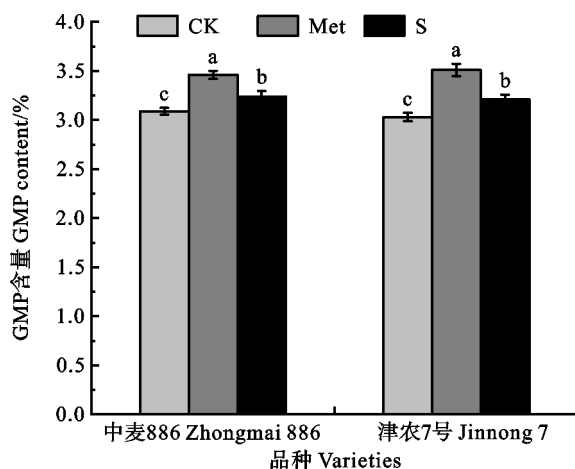
2.3.2 喷施硫肥对强筋小麦 GMP 体积分布的影响

喷施硫肥影响中麦 886 和津农 7 号籽粒 GMP 颗粒体积分布(图 3)。Met 处理下中麦 886 和津农 7 号粒径 $>110 \mu\text{m}$ 的 GMP 颗粒体积比例分别增加 3.57 和 6.87 个百分点,中、小粒径($0 \sim$

110 μm 和 $<10 \mu\text{m}$ 颗粒所占比例减少;S 处理下中麦 886 和津农 7 粒径 $>110 \mu\text{m}$ 的 GMP 颗粒分别增加 4.31 和 6.59 个百分点,中粒径颗粒所占比例有所减少。这说明喷施硫肥有利于强筋小麦籽粒中中小粒径 GMP 颗粒向大粒径颗粒的转化。

2.3.3 喷施硫肥对强筋小麦 GMP 表面积分布的影响

喷施硫肥减少了 GMP 颗粒粒径 $<12 \mu\text{m}$ 部分的表面积占比,增加 GMP 颗粒粒径在 $12\sim110 \mu\text{m}$ 和 $>110 \mu\text{m}$ 部分的表面积占比(表 4)。经方差分析,S 处理对 GMP 颗粒表面积分布占比影响显著。其中,S 处理下中麦 886 和津农 7 号的 GMP 颗粒粒径 $<12 \mu\text{m}$ 的表面积占比分别减少 5.93 和 8.09 个百分点,GMP 颗粒粒径在 $12\sim110 \mu\text{m}$ 之间的表面积占比分别增加 2.97 和 4.96 个百分点,GMP 颗粒粒径 $>110 \mu\text{m}$ 的表面积占比分别增加 2.96 和 3.13 个百分点。



同一品种图柱上的不同字母表示不同处理间差异达到 0.05 显著水平。下同。

Different letters above the columns indicate significant differences among different treatments of the same varieties at 0.05 level. The same in figures 4 and 5.

图 2 不同处理下强筋小麦籽粒的 GMP 含量

Fig. 2 GMP content of strong gluten wheat grains under different treatments

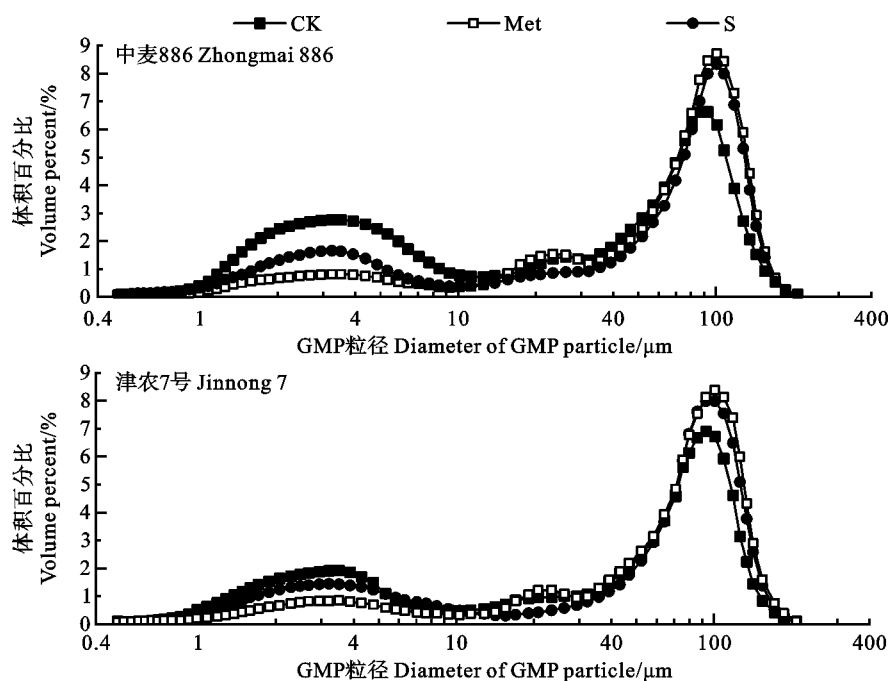


图 3 不同处理下小麦籽粒 GMP 的体积分布

Fig. 3 Volume distribution of grain GMP in wheat under different treatments

2.3.4 喷施硫肥对强筋小麦 GMP 数目分布的影响

强筋小麦 GMP 数目分布多集中在粒径 $<4.5 \mu\text{m}$ 部分,所占比例超过 98%(表 5)。Met 处理对 2 个强筋小麦品种的 GMP 数目分布没有显著影响;S 处理下中麦 886 和津农 7 号的 GMP 颗粒粒径 $<4.5 \mu\text{m}$ 的数目占比较 CK 分别减少 0.17 和 0.28 个百分点,粒径在 $4.5\sim12 \mu\text{m}$ 的数目占

比分别增加 0.15 和 0.26 个百分点,粒径 $>12 \mu\text{m}$ 的数目占比均增加 0.02 个百分点,且这些颗粒分布均变化显著。

2.4 喷施硫肥对强筋小麦籽粒 HMW-GS、LMW-GS 含量的影响

与 CK 相比,Met 处理均显著提高了中麦 886 和津农 7 号的 HMW-GS 含量,增幅分别为

14.9%和 10.14%(图 4);S 处理下中麦 886 的 HMW-GS 含量增加了 5.2%,与 CK 差异显著,而 S 处理对津农 7 号的 HMW-GS 含量没有显著影响。Met 处理和 S 处理均显著提高两个品种的 LMW-GS 含量,其中 Met 处理下增幅分别为 9.86%和 11.08%,S 处理下增幅分别为 8.89%和 12.53%。由此可见,喷施硫肥可有效调节强筋小麦谷蛋白亚基含量。

表 4 不同处理下强筋小麦 GMP 的表面积分布

Table 4 GMP surface area distribution of strong-gluten wheat under different treatments %

品种 Variety	处理 Treatment	粒径 Particle diameter/ μm		
		<12	12~110	>110
中麦 886 Zhongmai 886	CK	84.36a	11.78b	3.86b
	Met	83.18a	12.78b	4.04b
	S	78.43b	14.75a	6.82a
津农 7 号 Jinnong 7	CK	83.24a	12.75b	4.01b
	Met	82.46a	13.28b	4.26b
	S	75.15b	17.71a	7.14a

2.5 喷施硫肥对强筋小麦-SH 和-S-S-含量的影响

喷施两种硫肥均能显著提高中麦 886 和津农 7 号的-SH 和-S-S-含量(图 5)。与 CK 相比,中麦 886 和津农 7 号的-SH 含量增幅在 Met 处理下分别为 5.2%和 5.9%,S 处理下分别为 18.5%和 20.3%;两个品种的-S-S-含量增幅在 Met 处理下分别为 5.2%和 3.1%,S 处理下分别为 12.5%和 9.1%。

表 5 不同处理下强筋小麦 GMP 的数目分布

Table 5 Distribution of GMP number in strong-gluten wheat grains under different treatments %

品种 Variety	处理 Treatment	粒径 Particle diameter/ μm		
		<4.5	4.5~12	>12
中麦 886 Zhongmai 886	CK	98.68a	1.28b	0.04b
	Met	98.67a	1.29b	0.04b
	S	98.51b	1.43a	0.06a
津农 7 号 Jinnong 7	CK	98.76a	1.19b	0.05b
	Met	98.74a	1.21b	0.05b
	S	98.48b	1.45a	0.07a

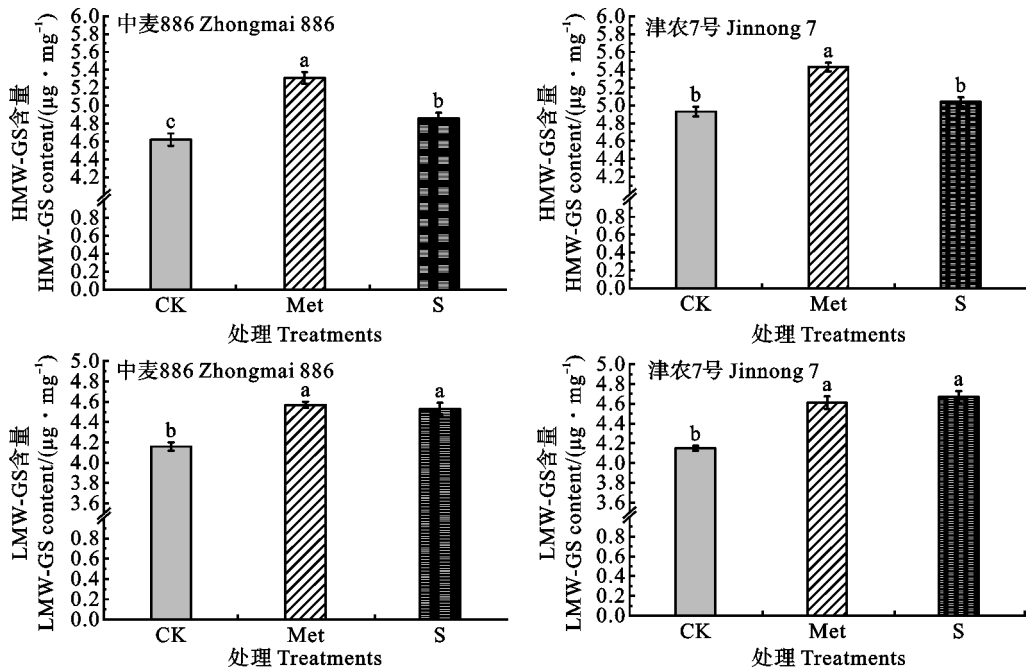


图 4 不同处理下强筋小麦籽粒的 HMW-GS、LMW-GS 含量

Fig. 4 Contents of HMW-GS and LMW-GS in strong gluten wheat grains under different treatments

2.6 喷施硫肥对强筋小麦加工品质的影响

喷施硫肥显著影响强筋小麦加工品质(表 6)。与 CK 相比,Met 处理下,中麦 886 的吸水量、形成时间、稳定时间、最大拉伸阻力、延伸度、能量、沉淀值和湿面筋含量均显著增加,津农 7 号

的形成时间、稳定时间、最大拉伸阻力、能量、沉淀值和湿面筋含量均显著增加;在 S 处理下,只有中麦 886 的湿面筋含量和津农 7 号的吸水量显著增加。这说明两种硫肥对小麦加工品质的影响存在差异,以 Met 的效果较优。

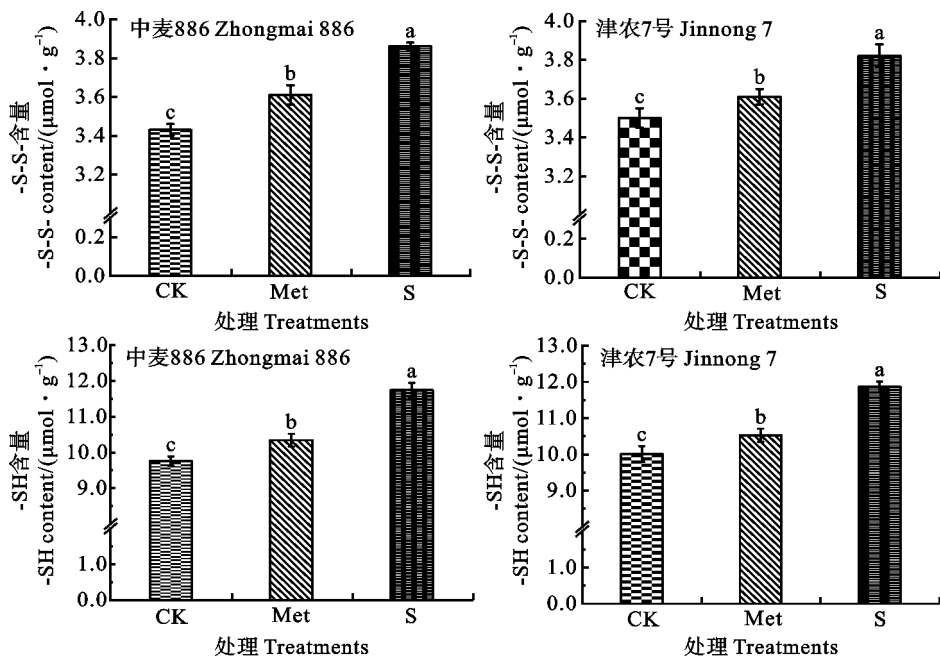


图 5 不同处理下强筋小麦籽粒的-S-S-和-SH 含量

Fig. 5 Contents of -S-S- and -SH in strong gluten wheat grains under different treatments

表 6 不同处理下强筋小麦的加工品质

Table 6 Processing quality of strong-gluten wheat under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	吸水量 Water absorption/ mL	形成时间 Development time/min	稳定时间 Stability time/min	最大阻力 Maximum resistance/ EU	延伸度 Extensibility/ mm	能量 Energy/ cm ²	沉淀值 Sedimentation value/mL	湿面筋 Wet gluten/%
中麦 886 Zhongmai 886	CK	63.53b	7.6b	15.7c	366b	179b	99b	41.0b	34.62b
	Met	64.87a	8.5a	23.8a	372a	208a	111a	43.0a	37.69a
	S	63.47b	7.6b	18.6b	362b	182b	103b	41.5b	36.16a
津农 7 号 Jinnong 7	CK	60.20b	7.2b	14.8b	376b	209a	101b	42.5b	34.18b
	Met	60.35b	10.7a	28.2a	417a	208a	114a	43.5a	36.82a
	S	61.70a	8.6b	15.3b	376b	210a	96b	42.5b	34.62b

3 讨论

3.1 施硫对强筋小麦产量及其构成因素的影响

硫肥影响小麦的产量形成主要体现在穗数、穗粒数及千粒重上^[18]。施硫可增加小麦穗分化过程中的小花数量,减少不育小花,通过增加穗粒数来提高产量^[19]。小麦产量随着施硫水平的升高而提高,60 kg · hm⁻² 硫肥处理下脂质与氨基酸代谢相关差异基因诱导表达,半胱氨酸、蛋氨酸、谷胱甘肽等氨基酸代谢水平提高,对小麦产量和蛋白质含量产生正向效应^[20-21]。土施硫肥对小麦穗粒数的调控效应主要发生于孕穗期的小花分化阶段。而本试验中花后叶面喷施硫肥时小麦穗部形态已建成,其对穗粒数无显著影响。小麦穗数在分蘖期决定,本试验中硫肥喷施时间晚于分

蘖期,故其对穗数也没有产生显著影响。房存金等^[22]研究表明,在一定的氮、磷、钾肥的基础上拔节期追施硫肥后小麦增产 12.2%,这与本研究结果不一致。本试验结果显示,花后喷施硫肥导致小麦产量降低,S 处理通过降低千粒重引起小麦减产,可能是因为施硫时期、施硫方式和类型不同,或由喷施浓度差异所致。

3.2 施硫对强筋小麦籽粒品质的影响

硫是合成二硫键的关键元素,也是蛋白质的必需成分,HMW-GS 和 LMW-GS 通过-S-S-链连接形成谷蛋白大聚合体,施用硫肥有利于-S-S-的形成,进而促进谷蛋白大聚合体的积累,对面筋蛋白的结构和稳定性以及小麦加工品质具有重要作用^[23]。缺硫会引起植物生长停滞,延迟蛋白质合成^[24]。朱云集等^[25]认为,硫肥对小麦籽粒总氮含

量影响不大,但能提高面粉中谷蛋白及谷蛋白聚合物含量。本试验条件下,施用硫肥增加了小麦籽粒中清蛋白、谷蛋白和谷蛋白大聚合体的含量。

GMP 含量是决定面筋强度的重要因素之一,其颗粒分布特征对面筋强度也有至关重要的影响^[26-27]。GMP 含量不仅直接关联着面粉的烘焙性能,还可通过烘焙性状影响小麦的整体品质^[28]。适量施硫肥可降低小粒径 GMP 颗粒体积和表面积百分比,提高大、中粒径 GMP 颗粒体积和表面积百分比,对数目百分比无显著影响^[6]。在本试验中,喷施硫肥可增加强筋小麦籽粒 GMP 大粒径颗粒所占比例,减少了中、小粒径颗粒所占比例,尤其是中粒径颗粒所占比例,表明施硫促进了 GMP 中小粒径颗粒向大粒径颗粒的转换,这对小麦的品质会产生积极的影响。

施硫显著提高了 GMP 和-S-S 的含量,从而提高了面团的形成时间、稳定时间等粉质参数^[29-30]。在本试验条件下,Met 处理显著提高面粉的形成时间、稳定时间、沉淀值和湿面筋含量;S 处理对形成时间、稳定时间、沉降值无显著影响,但增加了中麦 886 中面团的湿面筋含量。主要由于 Met 蕴含除硫元素以外的其他组分,这些组分与硫元素之间可能存在协同作用,共同对面粉及面团特性产生更为显著的影响。这说明不同种类的硫肥对强筋小麦湿面筋和沉淀值含量影响不同,氨基酸肥更有利于小麦湿面筋和沉淀值含量的增加。花后喷施两种硫肥对小麦加工品质有明显改善作用,Met 对品质的改善效果更优。

4 结论

施硫虽导致小麦产量略有下降,但显著促进了籽粒蛋白质组分重构。喷施甲硫氨酸处理显著优化了面团功能特性,表现为显著提高形成时间、稳定时间和最大拉伸阻力,对加工品质改良效果优于传统施硫处理。因此,通过花后喷施硫肥可通过优化小麦谷蛋白亚基聚合路径提升小麦品质。

参考文献:

- [1] 刘丽,杨金华,胡银星,等.麦谷蛋白亚基与小麦品质的关系研究进展[J].中国农业科技导报,2012,14(1):33.
LIU L, YANG J H, HU Y X, *et al.* Research progress in effects of glutenin subunits on wheat processing quality [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14 (1):33.
- [2] 李建楠.氮、硫肥对小麦品质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2011.
- LI J N. *The influence of nitrogen & sulphur on wheat quality* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.
- [3] 田由甲.甲硫氨酸和无机硫对小麦籽粒谷蛋白积累与加工品质的影响[D].南京:南京农业大学,2015.
TIAN Y J. Effects of combination use of methionine and inorganic sulfur on grain glutenin accumulation and processing quality in wheat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [4] 张秀.氮硫肥对强筋小麦产量和品质的调控效应及其机制研究[D].泰安:山东农业大学,2022.
ZHANG X. Regulation effect and mechanism of nitrogen and sulfur on grain yield and quality of strong gluten wheat [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [5] 曹丽,王振林,戴忠民,等.施氮时期对小麦籽粒 HMW-GS 积累及 GMP 粒度分布的影响[J].作物学报,2011,37(12):2241.
CAO L, WANG Z L, DAI Z M, *et al.* Effect of nitrogen fertilization timing on HMW-GS accumulation and GMP size distribution in wheat grains [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37 (12):2241.
- [6] 蔡铁,王振林,尹燕桦,等.氮硫肥配施对小麦籽粒谷蛋白大聚合物含量及粒度分布的影响[J].作物学报,2011,37(6):1060.
CAI T, WANG Z L, YIN Y P, *et al.* Combined effects of nitrogen and sulphur fertilization on content and size distribution of glutenin macropolymer in wheat grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(6):1060.
- [7] 刘志连,傅晓艺,王红光,等.施硫时期对强筋小麦产量和品质的影响[J].麦类作物学报,2024,44(7):878.
LIU Z L, FU X Y, WANG H G, *et al.* Effects of sulfur application stage on yield and quality of strong-gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(7):878.
- [8] 李建楠,罗勤贵,张蕾,等.氮硫肥对小麦主要品质性状的影响[J].麦类作物学报,2011,31(1):126.
LI J N, LUO Q G, ZHANG L, *et al.* Effects of nitrogen-sulfur treatment on main quality properties of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(1):126.
- [9] 孙允超,冀传允,张新,等.氮硫配施对强筋小麦品质、产量及构成要素的影响[J].中国农学通报,2024,40(16):7.
SUN Y C, JI C Y, ZHANG X, *et al.* Effect of sulphur and nitrogen combined application on quantity and yield and yield components of strong gluten wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(16):7.
- [10] 张海竹.晋南冬麦区硫肥对强筋小麦产量和品质的影响[J].湖北农业科学,2013,52(21):5155.
ZHANG H Z. Effects of sulfur fertilizer on the yield and quality of high-gluten wheat in Jinnan district [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(21):5155.
- [11] 姜丽娜,郑冬云,王言景,等.氮肥施用时期及基追比对豫中地区小麦叶片生理及产量的影响[J].麦类作物学报,2010,30(1):149.
JIANG L N, ZHENG D Y, WANG Y J, *et al.* Effects of application time and basal/topdressing ratio of nitrogen fertilizer on leaf physiology and grain yield of wheat in central

- Henan [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 149.
- [12] 杨晴, 郭守华. 植物生理生化实验[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010.
- YANG Q, GUO S H. Plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010.
- [13] WEEGELS P L, VAN DE PIJPEKAMP A M, GRAVELAND A, *et al.* Depolymerisation and re-polymerisation of wheat glutenin during dough processing. I. relationships between glutenin macropolymer content and quality parameters [J]. *Journal of Cereal Science*, 1996, 23(2): 103.
- [14] 孙辉, 姚大年, 李宝云, 等. 普通小麦谷蛋白大聚合体的含量与烘焙品质相关关系[J]. 中国粮油学报, 1998, 13(6): 13.
- SUN H, YAO D N, LI B Y, *et al.* Correlation between content of glutenin macropolymer (GMP) in wheat and baking quality [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 1998, 13(6): 13.
- [15] DON C, LICHTENDONK W J, PLIJTER J J, *et al.* The effect of mixing on glutenin particle properties: Aggregation factors that affect gluten function in dough [J]. *Journal of Cereal Science*, 2005, 41(1): 69.
- [16] 梁荣奇, 张义荣, 尤明山, 等. 小麦谷蛋白聚合体的 MS-SDS-PAGE 及其与面包烘烤品质的关系[J]. 作物学报, 2002, 28(5): 609.
- LIANG R Q, ZHANG Y R, YOU M S, *et al.* Multi-stacking SDS-PAGE for wheat glutenin polymer and its relation to bread-making quality [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(5): 609.
- [17] 张来林, 黄文浩, 肖建文, 等. 不同储藏条件对大豆、稻谷蛋白中巯基和二硫键的影响研究[J]. 粮食加工, 2012, 37(3): 67.
- ZHANG L L, HUANG W H, XIAO J W, *et al.* Study on the effect of different storage conditions on -SH and -S-S- from soybean and rice protein [J]. *Grain Processing*, 2012, 37(3): 67.
- [18] 牟文燕, 罗一诺, 张学美, 等. 影响我国主要麦区小麦籽粒硫含量的品种(系)与土壤因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 273.
- MU W Y, LUO Y N, ZHANG X M, *et al.* Cultivar (lines) and soil factors affecting wheat grain sulfur concentration in the major wheat-producing regions of China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2): 273.
- [19] 李府, 尹燕桦. 施硫对冬小麦穗花发育、籽粒蛋白质组分和品质指标的影响[J]. 山东农业科学, 2010, 42(10): 39.
- LI F, YIN Y P. Effects of sulfur fertilization on floret development, grain protein components and quality of different winter wheat genotypes [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2010, 42(10): 39.
- [20] ASSEFA S, HAILE W, TENA W. Effects of phosphorus and sulfur on yield and nutrient uptake of wheat (*Triticum aestivum* L.) on Vertisols, North Central, Ethiopia [J]. *Heliyon*, 2021, 7(3): e06614.
- [21] 董文楠, 兰会杰, 郝倩倩, 等. 氮硫互作对冬小麦干物质积累和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(2): 194.
- DONG W N, LAN H J, HAO Q Q, *et al.* Effects of nitrogen and sulfur interaction on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(2): 194.
- [22] 房存金, 刘艳侠, 刘新社. 施硫对强筋小麦产量及品质的影响[J]. 河南农业科学, 2010, 39(9): 55, 60.
- FANG C J, LIU Y X, LIU X S. Effect of sulfur application on yield and quality of strong gluten wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, 39(9): 55, 60.
- [23] 李文阳, 闫素辉, 刘明明, 等. 氮硫配施对小麦籽粒巯基、二硫键含量与蛋白质品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(1): 93.
- LI W Y, YAN S H, LIU M M, *et al.* Effect of nitrogen and sulfur applications on sulfhydryl group, disulfide bond and protein quality in wheat grain [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(1): 93.
- [24] KURMANBAYEVA M, SEKEROVA T, TILEUBAYEVA Z, *et al.* Influence of new sulfur-containing fertilizers on performance of wheat yield [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(8): 4644.
- [25] 朱云集, 沈学善, 李国强, 等. 硫吸收同化分配及其对小麦产量和品质影响的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(6): 134.
- ZHU Y J, SHEN X S, LI G Q, *et al.* Advance in sulphur uptake, assimilation, distribution and its effects on yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Triticeae Crops*, 2005, 25(6): 134.
- [26] PIROZI M R, MARGIOTTA B, LAFIANDRA D, *et al.* Composition of polymeric proteins and bread-making quality of wheat lines with allelic HMW-GS differing in number of cysteines [J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(1): 117.
- [27] OHM J B, ROSS A S, PETERSON C J, *et al.* Relationships of high molecular weight glutenin subunit composition and molecular weight distribution of wheat flour protein with water absorption and color characteristics of noodle dough [J]. *Cereal Chemistry*, 2008, 85(2): 123.
- [28] 蔡铁, 王振林, 尹燕桦, 等. 氮硫肥配施对小麦籽粒谷蛋白大聚合体含量及粒度分布的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(6): 1060.
- CAI T, WANG Z L, YIN Y P, *et al.* Combined effects of nitrogen and sulphur fertilization on content and size distribution of glutenin macropolymer in wheat grain [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(6): 1060.
- [29] 王钧强, 张明锁, 胡良勇. 硫肥对小麦产量和品质的影响[J]. 陕西农业科学, 2012, 58(2): 23.
- WANG J Q, ZHANG M S, HU L Y. Effect of sulfur fertilizer on wheat yield and quality [J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 58(2): 23.
- [30] 谢迎新, 朱云集, 祝小捷, 等. 硫肥对中筋小麦产量和加工品质的调控效应[J]. 作物学报, 2009, 35(8): 1532.
- XIE Y X, ZHU Y J, ZHU X J, *et al.* Effects of sulphur application on grain yield and processing quality in medium-gluten wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(8): 1532.