

周丽娟, 耿玉辉, 曹国军, 等. 秸秆还田配施硫肥对春玉米产量及硫素积累、分配特性的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(4): 17-24.
ZHOU Lijuan, GENG Yuhui, CAO Guojun, et al. Effects of straw returning combining with sulfur fertilizer on yield, sulfur accumulation and distribution in spring maize[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(4): 17-24.

秸秆还田配施硫肥对春玉米产量及硫素积累、分配特性的影响

周丽娟, 耿玉辉, 曹国军, 张美玲, 李 昊
(吉林农业大学 资源与环境学院, 吉林 长春 130118)

摘要:【目的】研究秸秆还田配施硫肥对春玉米产量及硫素的积累、分配与转运的影响, 为探明硫在春玉米中的积累转运规律及合理施用硫肥提供理论依据。【方法】试验采用双因素裂区设计, 主区包括秸秆还田和秸秆不还田 2 个水平, 副区包括配施硫肥和不配施硫肥 2 个水平, 共有 CK(不施任何肥料)、秸秆不还田不施硫、秸秆不还田施硫、秸秆还田不施硫和秸秆还田施硫 5 个处理。通过田间试验, 探讨秸秆还田配施硫肥对春玉米各器官中硫素的积累、分配与转运的影响。【结果】秸秆还田配施硫肥对春玉米有一定的增产作用, 秸秆还田施硫的玉米产量比秸秆还田不施硫提高 11.98%, 比秸秆不还田不施硫提高 20.34%。秸秆还田配施硫肥可显著提高春玉米植株硫素的积累量, 秸秆还田施硫的硫素积累量比秸秆不还田施硫提高 13.37%, 比秸秆不还田不施硫提高 52.67%。施硫可以提高玉米植株各器官中的硫素积累量, 施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥平均提高 36.07%, 各器官硫素积累量整体表现为籽粒>叶片>茎秆>穗部营养体。秸秆还田施硫的硫素总转运量最高, 达到 15.29 kg·hm⁻², 比秸秆不还田不施硫提高 74.54%, 硫素转运量对籽粒总贡献率提高 17.27%。【结论】秸秆还田配施硫肥可以促进春玉米的硫素积累以及玉米植株营养器官中硫素向籽粒的转运, 并最终提高春玉米产量。

关键词: 春玉米; 产量; 硫素; 秸秆还田; 养分积累; 养分分配
中图分类号: S143.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-411X(2021)04-0017-08

Effects of straw returning combining with sulfur fertilizer on yield, sulfur accumulation and distribution in spring maize

ZHOU Lijuan, GENG Yuhui, CAO Guojun, ZHANG Meiling, LI Hao
(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of straw returning combining with sulfur fertilizer on the yield and sulfur accumulation, distribution and transportation of spring maize, and provide theoretical bases for exploring the accumulation and transportation laws of sulfur fertilizer in spring maize as well as rational application of sulfur fertilizer. 【Method】Two-factor split block design was used, the main plot was divided into straw returning and no straw returning, the subplot was divided into sulfur fertilizer application and no sulfur fertilizer, which formed five treatments of CK (no fertilizer), no straw returning and no sulfur fertilizer, no straw returning and sulfur fertilizer, straw returning and no sulfur fertilizer, straw returning and sulfur fertilizer. The effects of straw returning combining with sulfur fertilizer application on the accumulation, distribution and

transportation of sulfur in spring maize were studied through the field experiment. 【Result】 Straw returning combining with sulfur fertilizer had a certain degree of increasing the yield. The maize yield of straw returning and sulfur fertilizer was 11.98% higher than that of straw returning and no sulfur fertilizer, and 20.34% higher than that of no straw returning and no sulfur fertilizer. Straw returning combining with sulfur fertilizer could significantly increase the accumulation of sulfur in spring maize. The sulfur accumulation amount of straw returning and sulfur fertilizer was 13.37% higher than that of no straw returning and sulfur fertilizer, and 52.67% higher than that of no straw returning and no sulfur fertilizer. Sulfur fertilizer application could increase the accumulation of sulfur in plant organs. The sulfur accumulation amount of sulfur fertilizer application treatment was averagely 36.07% higher than that of no sulfur fertilizer application treatment. The sulfur accumulation amount in each organ generally behaved as grain > leaf > stem > ear. Compared with the treatment of no straw returning and no sulfur fertilizer, total sulfur transport amount of straw returning and sulfur fertilizer treatment increased by 74.54%, reaching the highest of 15.29 kg·hm⁻², and total contribution rate of sulfur transport amount to grain increased by 17.27%. 【Conclusion】 Straw returning combining with sulfur fertilizer can promote the accumulation of sulfur in spring maize and the transportation of sulfur from vegetative organs to grains, and ultimately improve the yield of spring maize.

Key words: spring maize; yield; sulfur; straw returning; nutrient accumulation; nutrient distribution

近年来,随着粮食产量的不断提高及氮磷钾化肥的大量投入,土壤中、微量元素含量逐渐相对不足,并成为粮食产量进一步增加的限制因素^[1-2],土壤中、微量元素缺乏的国家和地区也明显增加。硫含量一般占植物干物质的 0.1%~0.5%,是继氮、磷、钾之后的第四大营养元素^[3]。缺硫会影响植物的产量及品质^[4],进而影响人类的健康^[5-8]。研究表明,硫参与叶绿素的合成并影响呼吸作用,从而调节植物的生长^[9]。陈国安^[10]研究发现,我国东北地区玉米、小麦、大豆均出现缺乏硫素症状。吴宇等^[11]研究指出,在缺硫条件下,大豆种子中含硫氨基酸的蛋白的积累明显下降,缺乏含硫氨基酸的 β -conglycinin 蛋白增加;Cys 和 Met 是合成蛋白质的必需氨基酸,充足的硫含量有利于富含 Cys 和 Met 的蛋白质含量提高,降低籽粒中的氮硫比例,提高籽粒的营养价值,从而影响大豆的品质。

中国是秸秆资源丰富的国家,每年产生的各种秸秆达 8 亿 t 以上^[12],这些秸秆绝大部分被焚烧或被用来做饲料和燃料。秸秆中含有有机质及丰富的营养元素^[13-15],实行玉米秸秆还田具有提高土壤肥力、改善土壤的理化性质和增产等作用^[16-18]。李荣等^[19]研究发现,秸秆还田可以提高玉米籽粒质量以及水分利用效率。朱泽亮等^[20]认为秸秆还田可以极大促进水稻的分蘖,提高植株高度及质量。虽然目前对硫肥及秸秆还田的研究相对较多,但对秸秆还田配施硫肥对春玉米生长及硫素积累分配影响的研究报道相对较少。本研究探讨了在秸秆还田的条件下配施硫肥对春玉米产量及硫素的积累、分配

及转运的影响,以期对硫素的合理调控及粮食的稳产高产提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2019 年在吉林省乾安县赞字乡父字村进行,试验土壤为黑钙土,0~20 cm 土壤耕层养分质量分数为:有机质 17.39 g·kg⁻¹、有效氮 102.36 mg·kg⁻¹、有效磷 35.86 mg·kg⁻¹、速效钾 109.38 mg·kg⁻¹、有效硫 15.36 mg·kg⁻¹,pH 7.86。试验田常年采用玉米连作模式。

1.2 试验设计

试验采用双因素裂区设计,主区分为秸秆还田(秸秆还田量为 12 000 kg·hm⁻²)和秸秆不还田 2 个水平,副区分为施硫(施硫量为纯硫 60 kg·hm⁻²)和不施硫 2 个水平,不施任何肥处理为对照(CK),共包括 CK、秸秆不还田不施硫、秸秆还田不施硫、秸秆不还田施硫、秸秆还田施硫 5 个处理。试验小区面积 39 m²(垄宽 0.65 m×6 垄×10 m 长),随机区组排列,重复 3 次。硫肥作为基肥施用,因施用量较小,为了撒施均匀,用塑料盆将每个小区的硫肥与一定量土壤混匀后手施撒入垄沟内。秸秆还田处理于春播前将秸秆粉碎覆于地面,通过旋耕将其与土壤充分混合,该地区农民采用膜下滴灌。玉米品种为‘富民 985’,每公顷种植 70 000 株。试验田的氮磷钾施用量参照当地常规施肥量:4 个试验处理均施氮 240 kg·hm⁻²,其中基肥占总施氮量的 40%,拔节期与抽雄期再分别各追施 30% 氮肥;4 个试验

处理均施 P_2O_5 100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 作为基肥一次性施入。5 月 9 日播种, 10 月 10 日收获, 其他管理同常规大田管理技术。

1.3 取样方法与时期

分别在春玉米的拔节期 (播种后第 55 天)、喇叭口期 (播种后第 64 天)、抽雄期 (播种后第 73 天)、灌浆期 (播种后第 94 天)、乳熟期 (播种后第 113 天)、完熟期 (播种后第 130 天) 进行田间采样。选择大小和长势均匀的玉米植株进行采集, 每个时期均采集 3 株, 按叶片、茎秆、穗部营养体 (苞叶和穗轴) 和籽粒分开, 于恒温箱内在 105 $^{\circ}\text{C}$ 条件下杀青 30 min, 再于 80 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘至恒质量后保存待测。

1.4 测定项目与方法

春玉米各器官中硫元素测定方法采用 HNO_3 - HClO_4 消煮法和原子分光光度法。

硫素转运量/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$ =营养体最大硫素积累量-成熟期营养体硫素积累量,

硫素转运率=硫素转运量/营养体最大硫素积累量 $\times 100\%$,

硫素转运对籽粒的贡献率=硫素转运量/成熟期籽粒硫素积累量 $\times 100\%$ 。

于完熟期每处理取 10 m^2 果穗, 称其总鲜质量, 按平均鲜穗质量从中取 10 穗, 待自然风干后考种,

考察产量与产量构成因素 (千粒质量和穗粒数等), 按含水量 14% 折算最终理论产量。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS Statistics 23 进行整理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田配施硫肥对春玉米产量及构成因素的影响

由表 1 可知, 施用硫肥显著提高了春玉米的千粒质量和穗粒数, 其中对穗粒数的提高更显著, 从而显著提高了春玉米的产量, 不同处理总体表现为秸秆还田施硫>秸秆不还田施硫>秸秆还田不施硫>秸秆不还田不施硫>CK。在无秸秆还田条件下, 施硫的产量比不施硫提高 11.70%; 秸秆还田条件下, 施硫的产量比不施硫增加 11.98%, 说明施用硫肥可以起到增产的效果。施用硫肥时, 秸秆还田的春玉米产量比无秸秆还田提高 7.73%; 无硫肥施用, 秸秆还田的春玉米产量比无秸秆还田增加了 7.46%, 说明秸秆还田能够起到增产的作用。秸秆与硫肥对产量无显著交互效应。

2.2 秸秆还田配施硫肥对春玉米硫素积累的影响

如图 1 所示, 随着生育期的延长, 春玉米植株

表 1 秸秆还田和施硫对春玉米产量和产量构成因素的影响及方差分析¹⁾

Table 1 Effects of straw returning and sulfur fertilizer application on yield and yield components of spring maize and variance analysis

处理 Treatment	千粒质量/g 1 000-grain weight	穗粒数 Kernel number	产量/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield	增产/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield increase	增产率/% Yield increase rate
CK	319.40d	379.76e	8 256.63d		
秸秆不还田不施硫 No straw returning and no sulfur fertilizer	329.10cd	467.12d	10 523.02c	2 266.40c	27.45c
秸秆不还田施硫 No straw returning and sulfur fertilizer	343.64b	482.20c	11 754.10b	3 497.47b	42.36b
秸秆还田不施硫 Straw returning and no sulfur fertilizer	336.10bc	505.72b	11 307.95b	3 051.32b	36.96b
秸秆还田施硫 Straw and sulfur fertilizer	367.70a	549.10a	12 663.11a	4 406.48a	53.37a
秸秆还田 Straw returning	10.036*	407.163*	30.571*		
施硫 Sulfur fertilizer application	22.156*	125.020*	71.261*		
秸秆还田 $\times$ 施硫 Straw returning $\times$ sulfur fertilizer application	3.027	29.298*	0.164		

1) 同列数据后不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著, “*”表示在 $P < 0.05$ 水平影响显著(Duncan’s 法)

1) Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level among different treatments, “*” indicates significant effect at $P < 0.05$ level (Duncan’s method)

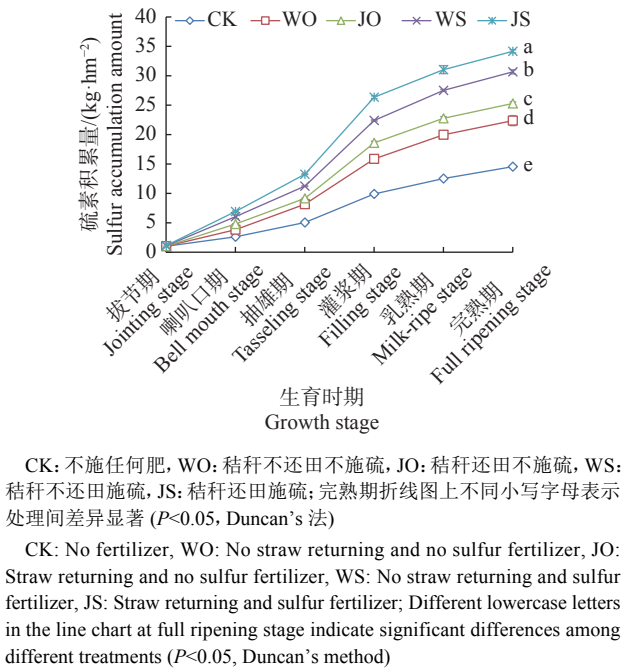


图 1 不同生育时期春玉米硫素的积累量

Fig. 1 Accumulation amount of sulfur in spring maize at different growth stages

中硫素积累量持续增加,至完熟期达到最大值;在灌浆期前硫素积累迅速,灌浆期至完熟期积累相对缓慢。其中 CK 处理硫素积累量最低,且在整个生育期硫素积累量增长曲线较为平缓,最大硫素积累量为 $14.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与其他 4 个处理存在显著差异。秸秆还田施硫处理的硫素积累量达到最大值,为 $34.16\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各处理硫素积累量整体表现为秸秆还田施硫>秸秆不还田施硫>秸秆还田不施硫>秸秆不还田不施硫>CK。秸秆还田条件下,施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 35.06%;秸秆不还田条件下,施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 37.09%,且差异显著,说明施用硫肥可以促进植物对硫的积累。在施用硫肥条件下,秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 11.37%;在不施硫肥条件下,秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 13.04%,说明秸秆还田也具有促进植株对硫素吸收积累的作用。秸秆还田施硫处理的硫素积累量比秸秆不还田不硫肥处理提高 52.67%,说明秸秆还田配施硫肥可以进一步促进植株对硫素的积累。

从图 2 可以看出,春玉米硫素积累量在各个时期呈现先上升后下降趋势,各时期硫素积累量总体表现为秸秆还田施硫>秸秆不还田施硫>秸秆还田不施硫>秸秆不还田不施硫>CK。硫素积累量最高峰出现在抽雄期至灌浆期,此时期最大硫素积累量为秸秆还田施硫处理,达到 $13.09\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,最低硫素积累量为 CK,积累量为 $4.85\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。硫素积累速率的规律同硫素积累量不同,其最大速率出现在

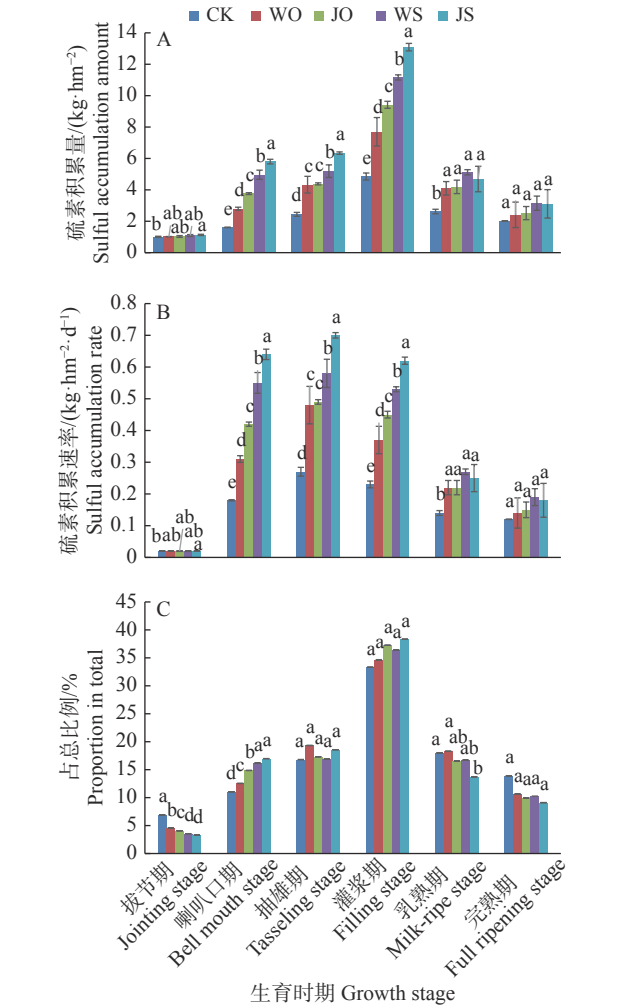


图 2 不同生育时期春玉米硫素积累动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of sulfur accumulation in spring maize at different growth stages

喇叭口期至抽雄期,其中最大积累速率为秸秆还田施硫处理,达到 $0.70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。各时期硫素积累量占总的硫素积累量比例的最高峰值出现在抽雄期至灌浆期,最高比例为秸秆还田施硫处理,达到 38.33%,最低比例为 CK 的 33.32%。

2.3 秸秆还田配施硫肥对春玉米器官中硫素积累的影响

2.3.1 秸秆还田配施硫肥对春玉米叶片中硫素积累的影响

如图 3A 所示,春玉米叶片中硫素积累量总体趋势表现为拔节期至灌浆期硫素积累量不断增加,至灌浆期达最大值,灌浆期至完熟期呈下降趋势。4 个试验处理灌浆期的叶片硫素积累量都显著高于 CK,其中秸秆还田条件下,施用硫肥处理

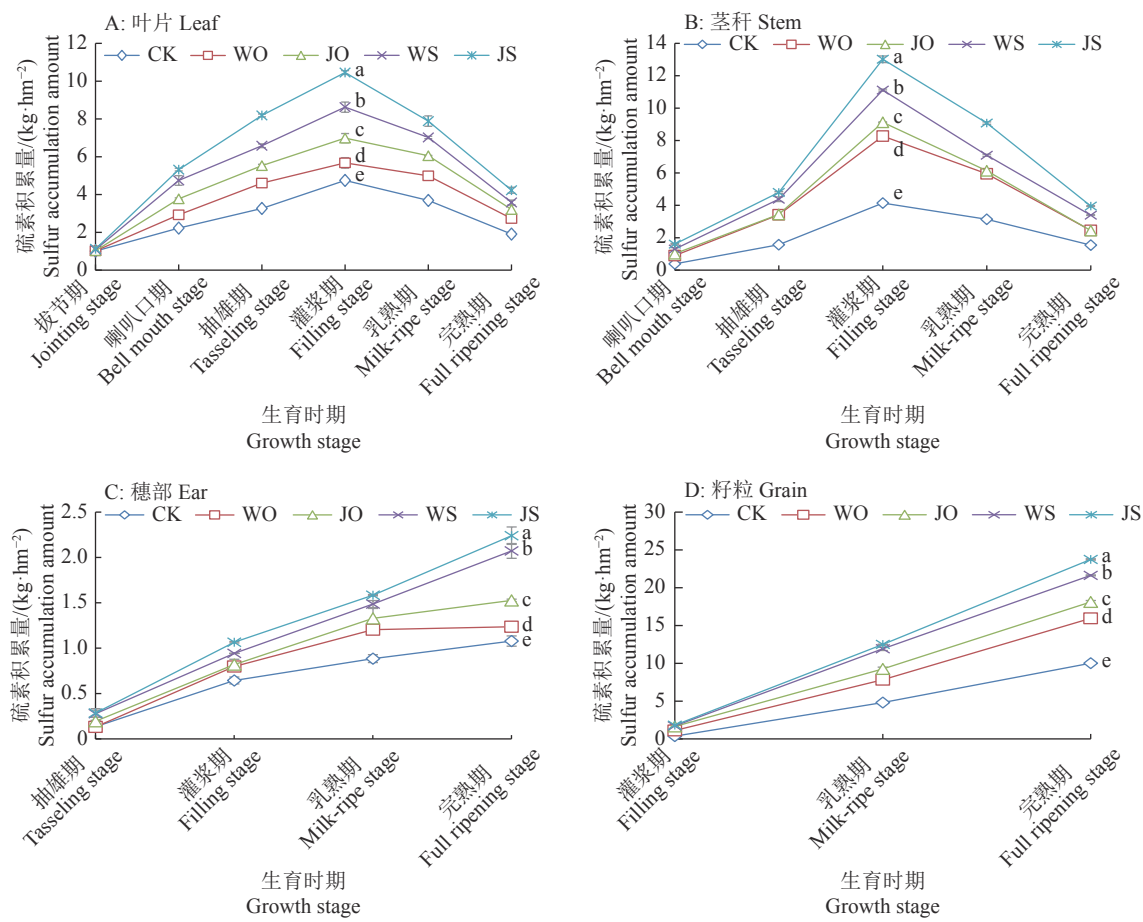


图 3 春玉米各器官硫素积累量

Fig. 3 Sulfur accumulation amount in each organ of spring maize

的叶片硫素积累量比不施硫肥处理提高 49.67%，秸秆不还田条件下，施用硫肥处理的叶片硫素积累量比不施硫肥处理提高 51.99%；施硫条件下，秸秆还田处理的硫素积累量比秸秆不还田提高 21.23%，不施硫条件下，秸秆还田处理的硫素积累量比秸秆不还田提高 23.10%。以上结果说明，秸秆还田和施硫都能够促进春玉米叶片硫素的积累。秸秆还田配施硫肥处理的硫素积累量比秸秆不还田且不施硫肥处理增加 84.25%，说明秸秆还田配施硫肥可以显著提高春玉米叶片硫素的积累量。

2.3.2 秸秆还田配施硫肥对春玉米茎秆中硫素积累的影响 图 3B 中，春玉米茎秆硫素积累量总体表现为先上升，至灌浆期达到最大值，灌浆期后开始下降。硫素积累速率最快的阶段为抽雄期至灌浆期。在灌浆期，4 个试验处理的硫素积累量均比 CK 显著增加。在秸秆还田条件下，施硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 42.66%，秸秆不还田条件下，施硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 34.35%，

说明施用硫肥可以促进春玉米茎秆中硫素的积累；在施用硫肥条件下，秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 17.13%，在无硫肥施入条件下，秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 10.31%。秸秆还田施硫处理的硫素积累量比秸秆不还田不施硫提高 57.37%，说明秸秆还田配施硫肥可以进一步促进茎秆中硫素的积累。

2.3.3 秸秆还田配施硫肥对春玉米穗部营养体中硫素积累的影响 由图 3C 可以得出，春玉米穗部营养体硫素积累量呈持续增加趋势，至完熟期达到最大值。春玉米穗部营养体的硫素积累量明显低于茎秆和叶片。秸秆还田条件下，施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 46.69%，在秸秆不还田条件下，施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 67.54%，说明施用硫肥促进了春玉米穗部营养体的硫素积累；在施用硫肥条件下，秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 8.11%，在无硫肥条件下，秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 23.48%，说

明秸秆还田具有促进春玉米穗部营养体硫素积累的作用。秸秆还田施硫的硫素积累量比秸秆不还田不施硫提高 81.14%，说明秸秆还田配施硫肥能够进一步促进春玉米穗部营养体硫素的积累。

2.3.4 秸秆还田配施硫肥对春玉米籽粒中硫素积累的影响 图 3D 可以得出，各处理春玉米籽粒中硫素积累量持续增加，至完熟期达到最大值。在秸秆还田条件下，施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 31.02%，在无秸秆还田条件下，施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 35.58%；在施用硫肥条件下，秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 9.76%，在不施硫肥条件下，秸秆还田的硫素积累量比秸秆不还田提高 13.57%。秸秆还田施硫的硫素积累量比秸秆不还田不施硫提高 48.80%。以上结果说明，秸秆还田配施硫肥可以进一步促进春玉米籽粒中硫素的积累。

春玉米籽粒的硫素积累量在所有器官中最高，玉米植株中各器官硫素积累量整体表现为籽粒>叶片>茎秆>穗部营养体。

2.4 秸秆还田配施硫肥对春玉米营养器官硫素转运的影响

由表 2 可知，不同处理茎秆的硫素转运量差异显著；在叶片的硫素转运量上，秸秆还田施硫和秸秆不还田施硫与其他处理差异显著。不同处理硫素总转运量表现为秸秆还田施硫>秸秆不还田施硫>秸秆还田不施硫>秸秆不还田不施硫>CK。其中秸秆还田施硫的硫素总转运量达到最高，为 15.29 kg·hm⁻²，比秸秆不还田不施硫提高 74.54%，说明秸秆还田配施硫肥促进了春玉米营养器官中硫素向籽粒中的转运。在转运率上，秸秆还田不施硫的茎秆转运率显著高于其他处理，但叶片转运率和总转运率在不同处理间差异不显著。在硫素转运量对籽粒贡献率上，不同处理间的贡献率大小与转运量规律基本一致，其中秸秆还田施硫的总贡献率为所有处理中最高，达到 64.43%，比秸秆不还田施硫、秸秆还田不施硫、秸秆不还田不施硫及 CK 处理分别提高 9.15%、11.53%、17.27% 和 18.61%。

表 2 秸秆还田和施硫对成熟期春玉米植株硫素转运特征的影响¹⁾

Table 2 Effects of straw returning and sulfur fertilizer application on sulfur transport characteristics of spring maize at mature stage

处理 Treatment	转运量/(kg·hm ⁻²) Transport amount			转运率/% Transport rate			对籽粒贡献率/% Contribution rate to grain		
	茎秆 Stem	叶片 Leaf	总和 Total	茎秆 Stem	叶片 Leaf	总和 Total	茎秆 Stem	叶片 Leaf	总和 Total
CK	2.60e	2.84c	5.44e	62.72c	59.78a	61.25a	25.94c	28.38a	54.32b
WO	5.82d	2.94c	8.76d	70.32b	51.29a	60.80a	36.47b	18.47b	54.94b
JO	6.68c	3.78c	10.46c	73.26a	53.99a	63.62a	36.90ab	20.87ab	57.77ab
WS	7.72b	5.04b	12.77b	69.47b	58.58a	64.02a	35.70b	23.33ab	59.03ab
JS	9.06a	6.23a	15.29a	69.61b	59.58a	64.60a	38.18a	26.25a	64.43a

1) CK: 不施任何肥, WO: 秸秆不还田不施硫, JO: 秸秆还田不施硫, WS: 秸秆不还田施硫, JS: 秸秆还田施硫; 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$, Duncan's 法)。

1) CK: No fertilizer, WO: No straw returning and no sulfur fertilizer, JO: Straw returning and no sulfur fertilizer, WS: No straw returning and sulfur fertilizer, JS: Straw returning and sulfur fertilizer; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$, Duncan's method)

3 讨论与结论

3.1 秸秆还田配施硫肥对春玉米产量及构成因素的影响

适宜的硫肥处理能够提高小麦的穗粒数、结实率和千粒质量^[21]，特别是施用硫肥对多穗型‘豫麦 49’产量的提高幅度较大^[22]。施用硫肥提高了小麦叶片的光合特性、干物质积累^[23]及籽粒产量^[24]。施用锌肥可以提高玉米的产量，比不施锌肥增产 5.2%，且在一定的范围内产量随着施锌量的增加而增加^[25]。因此，施用一定量的中、微量元素化肥有一定的增产作用。本研究中，秸秆还田施硫的产量比

秸秆还田不施硫提高 11.98%，秸秆不还田施硫比秸秆还田不施硫、秸秆不还田不施硫和 CK 的产量分别增加 3.95%、11.70% 和 42.36%，说明施用硫肥对春玉米有一定的增产作用，这与前人的研究结论^[26-27]基本符合。

秸秆还田影响植物生长发育主要通过 2 种方式，一是玉米秸秆中含有丰富的有机质、氮磷钾和中微量元素等养分，通过腐解直接释放营养物质供给作物生长发育；二是秸秆还田后能够促进微生物大量繁殖，改善土壤微生物环境和理化特性，间接促进作物生长^[28]，从而起到增产作用^[29-31]。本试验中秸秆还田施硫处理的产量比秸秆不还田施硫处理

提高 7.73%; 秸秆还田施硫的产量比秸秆不还田不施硫增加 20.34%, 比 CK 增加 53.37%, 说明秸秆还田配施硫肥可以进一步提高春玉米产量。

3.2 秸秆还田配施硫肥对春玉米硫素积累的影响

研究指出施用硫肥提高了冬小麦地上部营养器官的硫含量, 其中施用 112.5 和 150.0 kg·hm⁻² 硫肥处理地上部营养器官的硫含量与不施用硫肥相比, 均达显著差异水平^[32]。曹殿云^[33] 研究指出, 适量的硫肥能够促进玉米硫素吸收, 完熟期施用 80 kg·hm⁻² 硫肥处理的地上部营养器官硫素积累量与不施用硫肥处理具有显著差异。本研究中, 在春玉米成熟期, 秸秆不还田条件下, 配施硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 37.09%; 秸秆还田条件下, 配施硫肥的硫素积累量比不施硫肥提高 35.06%, 再次证明施用硫肥促进春玉米对硫素的吸收和积累。曹殿云等^[34] 研究发现玉米对硫素的最高吸收强度出现在喇叭口期和抽雄期, 本研究发现抽雄期的春玉米硫素积累速率在整个生育期中最高, 说明在此时期一定要保证硫素的供应。崔彦宏等^[35] 研究指出, 夏玉米有 2 个硫素吸收高峰期, 分别出现在喇叭口至抽雄期和吐丝后第 30~45 天, 王空军等^[36] 指出夏玉米吸收硫素有 2 个高峰期, 分别为拔节期至大口期和开花期至乳熟期。本试验中硫素吸收出现 1 个高峰期, 是抽雄期至灌浆期。由于之前的研究材料都为夏玉米, 本试验的研究材料为春玉米, 说明关键时期的养分补充要考虑不同品种的差异。

秸秆还田既能释放各种大、中、微量元素, 又能提高土壤对水、肥、气、热的供应和协调能力^[37], 从而促进作物对养分的吸收与积累^[13, 38]。本研究中, 至春玉米成熟期, 秸秆还田施硫的硫素积累量比秸秆不还田施硫提高 13.37%, 证明秸秆还田可以促进春玉米对硫素的吸收和积累; 秸秆还田施硫的硫素积累量比秸秆不还田不施硫提高 52.67%, 说明秸秆还田配施硫肥能够进一步促进春玉米对硫素的吸收和积累。

3.3 秸秆还田配施硫肥对春玉米器官中硫素分配及转运的影响

研究指出小麦开花前硫主要分配在叶片、茎秆和叶鞘中, 后期则开始向籽粒转运^[39]。本研究春玉米叶片及茎秆中硫素积累量都在灌浆期达到最高峰, 然后开始降低, 而籽粒的硫素积累则从灌浆期开始持续增加至完熟期达到最高。春玉米营养生长期硫素的积累以叶片和茎秆为主, 后期则以籽粒为中心进行积累。刘宝存等^[40] 指出完熟期玉米植株器官硫素积累量大小趋势为籽粒>叶片>茎秆>穗部器官, 本研究在完熟期硫素积累量同样表现为籽粒>叶片>茎秆>穗部营养体。秸秆还田可以促进植

株对锰元素的吸收, 植株的不同器官中锰的积累量始终高于对照^[41], 而有机肥和无机肥配施可以显著提升氮磷钾养分在水稻中的积累^[42]。本研究中, 秸秆还田提高了各器官中硫素的积累, 不配施硫肥条件下, 秸秆还田处理玉米籽粒中硫素积累量比秸秆不还田提高 13.57%, 说明秸秆还田促进春玉米各器官的硫素积累。

王东等^[43] 研究指出由茎秆转入籽粒的硫素最多, 叶片中的硫素转入量次之。本研究中秸秆还田施硫处理的茎秆硫素转运量达到最高, 为 9.06 kg·hm⁻², 叶片转运量最高为 6.23 kg·hm⁻², 与上述研究结果相符。有研究指出施用硫肥能够促进硫的吸收利用, 增加小麦花后氮、硫从营养器官中向籽粒转运, 增加总运转量对籽粒硫素含量的贡献率^[32, 44]。本试验中秸秆不还田施硫对籽粒的总贡献率比不施硫提高 7.44%, 秸秆还田施硫对籽粒的总贡献率比不施硫提高 11.53%, 说明施用硫肥提高了春玉米器官茎秆、叶片中硫素转运量对籽粒的贡献率。

3.4 结论

施用硫肥能够促进春玉米的硫素积累, 本研究中施用硫肥的硫素积累量比不施硫肥平均提高 36.07%。玉米植株中各器官硫素积累量整体表现为籽粒>叶片>茎秆>穗部营养体。施硫提高了植株各器官中的硫素含量, 并促进营养器官中硫素向籽粒转运, 提高了转运硫素对籽粒中硫素的贡献率。秸秆还田配施硫肥能够进一步促进春玉米的硫素积累以及植株营养器官硫素向籽粒的转运, 并最终提高春玉米产量。

参考文献:

[1] 张美玲, 耿玉辉, 曹国军, 等. 秸秆还田下施镁对土壤交换镁及春玉米镁素积累和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 226-231.

[2] 张国芹, 牟建梅, 徐瑶, 等. 施硫对苋菜生长及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(35): 48-49.

[3] 刘洋, 石慧清, 龚月桦. 硫氮配施对持绿型小麦氮素运转及叶片衰老的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(6): 1206-1213.

[4] 司贤宗, 张翔, 索炎炎, 等. 施硫对花生生产质量和硫吸收利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(6): 59-63.

[5] 刘崇群. 中国南方土壤硫的状况和对硫肥的需求[J]. 磷肥与复肥, 1995(3): 14-18.

[6] BEARCHELL S J, FRAAIJE B A, SHAW M W, et al. Wheat archive links long-term fungal pathogen population dynamics to air pollution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(15): 5438-5442.

[7] MIYAKE T, SAMMOTO H, KANAYAMA M, et al. Role of the sulphate assimilation pathway in utilization of glutathione as a sulphur source by *Saccharomyces*

- cerevisiae*[J]. *Yeast*, 1999, 15(14): 1449-1457.
- [8] DAOUDI M, SINGH R. Effect of nitrogen and sulphur on growth and yield of hybrid maize (*Zea mays* L.)[J]. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, 6(6): 1930-1935.
- [9] 李惠民, 王保莉. 玉米硫素营养状况及应用研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2008, 10(4): 16-21.
- [10] 陈国安. 我国东北黑土地区农业中的硫素问题[J]. 中国农学通报, 1994, 10(3): 36-38.
- [11] 吴宇, 高蕾, 曹民杰, 等. 植物硫营养代谢、调控与生物学功能[J]. 植物学通报, 2007, 24(6): 735-761.
- [12] 刘文国, 赵强, 杨艳美. 秸秆还田处理对土壤理化性状及玉米产量的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(27): 111-117.
- [13] 张宇飞, 刘立志, 马昱萱, 等. 耕作和秸秆还田方式对玉米产量及钾素积累转运的影响[J]. 作物杂志, 2019(2): 122-127.
- [14] 高日平, 赵思华, 刁生鹏, 等. 秸秆还田对黄土风沙区土壤微生物、酶活性及作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1370-1377.
- [15] LI H, DAI M W, DAI S L, et al. Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 159: 293-300.
- [16] 鲍彩英. 玉米秸秆还田技术[J]. 农民致富之友, 2018(21): 31.
- [17] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 秸秆还田后效对玉米氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(20): 4237-4247.
- [18] JIANG H, HAN X Z, ZOU W X, et al. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 268: 133-143.
- [19] 李荣, 侯贤清, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 289-298.
- [20] 朱泽亮, 陶胜. 钾肥和稻草对水稻生长及产量的影响[J]. 土壤, 1992(6): 310-311.
- [21] 马春英, 李雁鸣, 韩金玲. 不同种类硫肥对冬小麦光合性能和子粒产量性状的影响[J]. 华北农学报, 2004, 19(1): 67-70.
- [22] 谢迎新, 朱云集, 郭天财. 施用硫肥对两种穗型冬小麦品种群体生理、产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2003, 23(1): 44-48.
- [23] 谢迎新, 刘超, 朱云集, 等. 氮、硫配施对冬小麦氮素利用效率及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 64-71.
- [24] ZHAO F J, SALMON S E, WITHERS P J, et al. Variation in the breadmaking quality and rheological properties of wheat in relation to sulphur nutrition under field conditions[J]. *Journal of Cereal Science*, 1999, 30(1): 19-31.
- [25] 张庆栋, 李晓菲, 张淑艳, 等. 中微量元素锌在玉米上的施用效果试验[J]. 农业开发与装备, 2019(10): 128-129.
- [26] MANDAL K G, SINHA A C. Effect of integrated nutrient management on growth, yield, oil content and nutrient uptake of Indian mustard (*Brassica juncea*) in foothills soils of eastern India[J]. *Indian Journal of Agronomy*, 2002, 47(1): 109-113.
- [27] RILEY N G, ZHAO F J, MCGRATH S P. Availability of different forms of sulphur fertilisers to wheat and oilseed rape[J]. *Plant and Soil*, 2000, 222(1/2): 139-147.
- [28] 崔俊讲, 周明先, 张红英, 等. 秸秆还田条件下不同氮肥用量对冬小麦产量及氮肥利用效率的影响[J]. 农学学报, 2020, 10(8): 47-51.
- [29] 白伟, 张立祯, 逢焕成, 等. 秸秆还田配施氮肥对东北春玉米光合性能和产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(12): 1845-1855.
- [30] 战秀梅, 彭靖, 李秀龙, 等. 耕作及秸秆还田方式对春玉米产量及土壤理化性状的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(3): 204-209.
- [31] 周怀平, 解文艳, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 321-330.
- [32] 赵玉霞, 李娜, 王文岩, 等. 施用硫肥对陕西关中地区冬小麦氮、硫吸收与转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1321-1328.
- [33] 曹殿云. 硫、锌肥对玉米生长发育、元素吸收及产量的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [34] 曹殿云, 王宏伟, 徐晓旭. 硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1298-1305.
- [35] 崔彦宏, 张桂银, 郭景伦, 等. 高产夏玉米硫的吸收与再分配研究[J]. 玉米科学, 1993, 1(1): 48-52.
- [36] 王空军, 胡昌浩, 董树亭. 夏玉米硫素吸收与时空分布研究[J]. 作物学报, 2000, 26(6): 899-904.
- [37] 朱庆杰. 浅析玉米秸秆还田技术的利弊[J]. 种子科技, 2019, 37(15): 145.
- [38] 张维乐, 戴志刚, 任涛, 等. 不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(7): 1254-1266.
- [39] 党红凯, 孙亚辉, 张馨文, 等. 超高产冬小麦硫素的吸收、积累和分配的研究[C]//中国作物学会. 作物逆境生理研究进展: 中国作物生理第十次学术研讨会文集. 北京: 科学出版社, 2007: 109-117.
- [40] 刘宝存, 吴静, 孙明德. 夏玉米硫的吸收、累积及分配的研究[C]//中国土壤学会青年工作委员会. 青年学者论土壤与植物营养科学: 第七届全国青年土壤暨第二届全国青年植物营养科学工作者学术讨论会论文集. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 340-345.
- [41] 于淼, 王志学, 吴红艳, 等. 秸秆还田技术对红干椒植株以及土壤中微量元素的影响[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(2): 32-35.
- [42] 柳开楼, 张会民, 韩天富, 等. 长期化肥和有机肥施用对双季稻根茬生物量及养分积累特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3540-3548.
- [43] 王东, 于振文, 王旭东. 硫肥对冬小麦硫素吸收分配和产量的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(5): 791-793.
- [44] 张军, 吴秀宁, 陈新宏. 小麦骨干品种小偃 22 研究进展[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(2): 65-69.