麦类作物学报 2024,44(7):878－884
Journal of Triticeae Crops doi:10.7606/j.issn.1009-1041.2024.07.07

网络出版时间:2024-05-09
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20240507.1717.002

施硫时期对强筋小麦产量和品质的影响

刘志连[1,2],傅晓艺[3],王红光[1],李东晓[1],李瑞奇[1]

(1.河北农业大学农学院,河北保定 071001;2.石家庄市藁城区农业科学研究所,河北石家庄 052160;
3.石家庄市农林科学院,河北石家庄 050000)

摘 要:为明确不同时期施硫对强筋小麦产量和品质的效应,于2019—2021年2个小麦生长季,以藁优2018为试验材料,设置播前(Sb)、拔节期(Sj)、开花期(Sa)3个施硫时期,施硫量为60 kg·hm^{-2},以不施硫(CK)为对照,测定并分析了不同处理下强筋小麦产量和品质相关指标。结果表明,与CK相比,Sb和Sa处理均能显著提高藁优2018的千粒重和产量,2个生长季千粒重增幅分别为6.23%和7.04%,产量增幅分别为9.20%和5.71%;施硫时期对藁优2018的穗数和穗粒数影响不显著。3种施硫处理的面团形成时间和稳定时间均较CK显著提高,Sa和Sb处理优于Sj处理;Sa处理2个生长季较CK增幅达48.78%和32.63%。2个生长季Sa处理的湿面筋含量、Zeleny沉降值、蛋白质含量和谷醇比较CK平均增幅依次为8.88%、8.31%、6.61%和10.48%。综上,施硫对强筋小麦的产量和品质具有正向调控效应,开花期为本试验条件下最佳施硫期。

关键词:强筋小麦;施硫时期;产量;品质

中图分类号:S512.1;S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2024)07-0878-07

Effects of Sulfur Application Stage on Yield and Quality of Strong-Gluten Wheat

LIU Zhilian[1,2], FU Xiaoyi[3], WANG Hongguang[1], LI Dongxiao[1], LI Ruiqi[1]

(1. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China; 2. Gaocheng Institute of Agricultural Sciences, Shijiazhuang, Hebei 052160, China; 3. Shijiazhuang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050000, China)

Abstract: In order to clarify the effects of sulfur application at different growth stages on the yield and quality of strong-gluten wheat, a field experiment was conducted during the 2019－2021 wheat growing seasons using the variety Gaoyou 2018 as material. Three treatments [before sowing(Sb), topdressing at jointing stage(Sj) and topdressing at anthesis stage(Sa)] with sulfur application of 60 kg·hm^{-2} were set up, with no-sulfur application as control to study the effect of sulfur application on the grain yield and quality of strong-gluten wheat. The results showed that compared to the control, both Sb and Sa significantly increased the thousand kernel weight(TKW) and yield of Gaoyou 2018. The average increase rate of TKW in the two growing seasons was 6.23% and 7.04%, and the average increase rate of yield was 9.20% and 5.71%, respectively. However, sulfur application had no significant effect on the number of ears and grains per spike of Gaoyou 2018. The dough formation time and stability time of the three sulfur treatments were significantly improved, with Sb and Sa better than that of Sj treatment, and Sa had the best effect, with increase rates reaching 48.78% and 32.63%, respectively. The Sa treatment also resulted in the largest increases in grain wet gluten content, Zeleny sedimentation value, protein content and gliadin/glutenin, with increase rates of 8.88%, 8.31%, 6.61% and 10.48%, respectively. In conclusion, sulfur application has a positive effect on the yield and quality of

收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-31
基金项目:国家小麦产业技术体系专项(CARS-03-51)
第一作者 E-mail:lovelybinbin348@163.com(刘志连)
通讯作者 E-mail:li-rq69@163.com(李瑞奇)

strong-gluten wheat, with the Sa being the optimal fertilization treatment under the conditions of this experiment.

Keywords: Strong-gluten wheat; Sulfur application stage; Grain yield; Quality

硫是植物生长必需的营养元素[1]。近年来，大气中二氧化硫排放的减少和农业生产中无硫及新型化肥的广泛应用，造成了耕作系统普遍缺硫[2]。作为氨基酸、叶绿体、硫脂和维生素的组成部分[3]，硫可以调节植物的生长，并参与植物解毒、防卫和抗逆等过程[4]。研究发现，缺硫会导致小麦植株矮小、成熟延迟和产量降低，并减少籽粒含硫氨基酸比例，阻碍蛋白质合成[5]；施硫可使河南黄河冲积平原的小麦增产 6.4%～20.9%[6]；砂土麦田拔节期施硫显著提高了小麦产量[7]；施硫可以显著提晋南高强筋小麦临优 145 产量、穗粒数和成穗数，但对千粒重的影响不显著[8]；在一定施氮水平下，适量施硫显著提高了山东泰安烟农 19 和汶农 6 号产量[9]；孕穗期追施硫肥有利于江苏南京中筋小麦成熟籽粒蛋白质含量，效果优于播种期、拔节期和开花期[10]；施硫能改善面筋蛋白的组成，提高焙烤产品质量[11]。前人就小麦施硫对产量、品质效应的研究结果存在较大差异，符合作物栽培的区域性和复杂性特点。有关河北平原麦区施硫对强筋小麦产量和品质效应的研究鲜见报道。本试验以强筋小麦品种藁优 2018 为材料，研究不同时期施硫对小麦产量和品质的影响，为该地区强筋小麦产量和品质协同提升栽培技术提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2019—2020 和 2020—2021 年度在河北省石家庄市藁城区科技园（E114.8°，N38.0°）进行。供试材料为强筋小麦品种藁优 2018。试验田土壤为中壤褐土，两年耕层（0～20 cm）有机质含量 1.9%和 1.7%，全氮含量 1.3 和 2.0 g·kg^{-1}，速效磷含量 24.2 和 26.9 mg·kg^{-1}，速效钾含量 173.3 和 186.1 mg·kg^{-1}，有效硫含量 22.1 和 24.8 mg·kg^{-1}。

采用二因素裂区试验，设 3 个施硫时期，分别为播前（Sb），拔节期（Sj），开花期（Sa），施硫量为 60 kg·hm^{-2}，所用硫肥为硫酸钾（含 S 17.5%，K_2O 52%），以不施硫为对照（CK）。鉴于硫肥中含钾，对照施等量钾以消除施钾可能产生的效应。钾肥用氯化钾（含 K_2O 60%），施用量与施硫处理的钾量相同，具体见表 1。小区面积 45 m^2，3 次重复。氮、磷施用量分别为 240 kg N·hm^{-2} 和 120 kg P_2O_5·hm^{-2}。氮肥、磷肥的种类分别为尿素（N 46%）、二铵（N 18%，P_2O_5 46%）。全部的磷和 50%氮底施，另 50%的氮在拔节期追施。2019 年 10 月 8 日足墒播种，2020 年 6 月 6 日收获。2020 年播前灌溉 60 mm，10 月 5 日播种，2021 年 6 月 13 日收获。基本苗为 330 万株·hm^{-2}。拔节期和开花期分别灌溉 60 mm。其他管理措施同当地高产田。

1.2　产量及其构成因素的测定

成熟期每个小区选取长势均匀的 2 m^2 收获，并按 13.0%的标准含水量的计算实收产量；在定点处调查成穗数；连续选取 20 个穗，调查穗粒数。取风干小麦籽粒测千粒重。

1.3　籽粒品质指标测定

1.3.1　粗蛋白含量

将烘干后的小麦粉碎过 100 目筛，取 0.200 g，用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮后加水定容到 50 mL，用

表 1　试验施肥设计

Table 1　Treatment of sulfur application in the experiment

主区 Main plots	副区 Sub-plots	试验名称 Treatments	所用肥料 Fertilizer	肥料施用量 Application rate/(kg·hm^{-2})	S 含量 S content/(kg·hm^{-2})	K_2O 含量 K_2O content/(kg·hm^{-2})
施硫 Sulfur application	播前 Before sowing	Sb	硫酸钾 Potassium sulfate	342.86	60.00	178.31
	拔节期 Jointing stage	Sj		342.86	60.00	178.31
	开花期 Anthesis stage	Sa		342.86	60.00	178.31
不施硫（对照） No sulfur(control)	播前 Before sowing	Kb	氯化钾 Potassium chloride	297.18	0	178.31
	拔节期 Jointing stage	Kj		297.18	0	178.31
	开花期 Anthesis stage	Ka		297.18	0	178.31

AA3 流动分析仪(德国 SEAL 公司生产)测定含氮量[12]。蛋白质含量的计算采用国标 GB2905-1982,参考谷类、豆类作物种子标准的粗蛋白质测定法[13]。重复 3 次。

1.3.2 蛋白质组分

根据 Amagliani 等[14]的方法稍作修改。称取 1.0 g 样品,悬浮于 5 mL 10%氯化钠后,于 20 ℃振荡提取 1 h;4 400 r·min^{-1} 离心 15 min,取上清液即清蛋白和球蛋白;将上清液转移到 50 mL 的容量瓶中,向所剩残渣中加入 5 mL 75%乙醇,于 20 ℃振荡提取 30 min,4 400 r·min^{-1} 离心 15 min,所得上清液即为醇溶蛋白;继续向所剩残渣加入 5 mL 0.2%氢氧化钠,于 20 ℃下振荡提取 30 min,4 400 r·min^{-1} 离心 15 min 后,所得上清液即为谷蛋白。每一组分提取步骤重复两次,转移到 50 mL 容量瓶中后用相应的提取液定容。定容后的待测液,转移到胶卷盒中,4 ℃冰箱保存。利用考马斯亮蓝法测定各组分的蛋白质含量。重复 3 次。

1.3.3 沉降值

采用布勒试验磨(无锡)制粉。参照 GB/T 21119-2007/ISO 5529:1992 测定 Zeleny 沉降值。重复 3 次。

1.3.4 粉质参数

参照 GB/T 14614-2019,采用德国 Brabender 公司的粉质仪(Brabender AT)测定面团的形成时间和稳定时间。重复 3 次。

1.3.5 湿面筋含量及面筋指数

参照 SB/T 10248-1024-95 方法,采用土耳其 YUCEBAS 科技有限公司生产的 Y07 面筋仪洗涤面筋,测定湿面筋含量并计算面筋指数。重复 3 次。

1.4 数据统计与分析

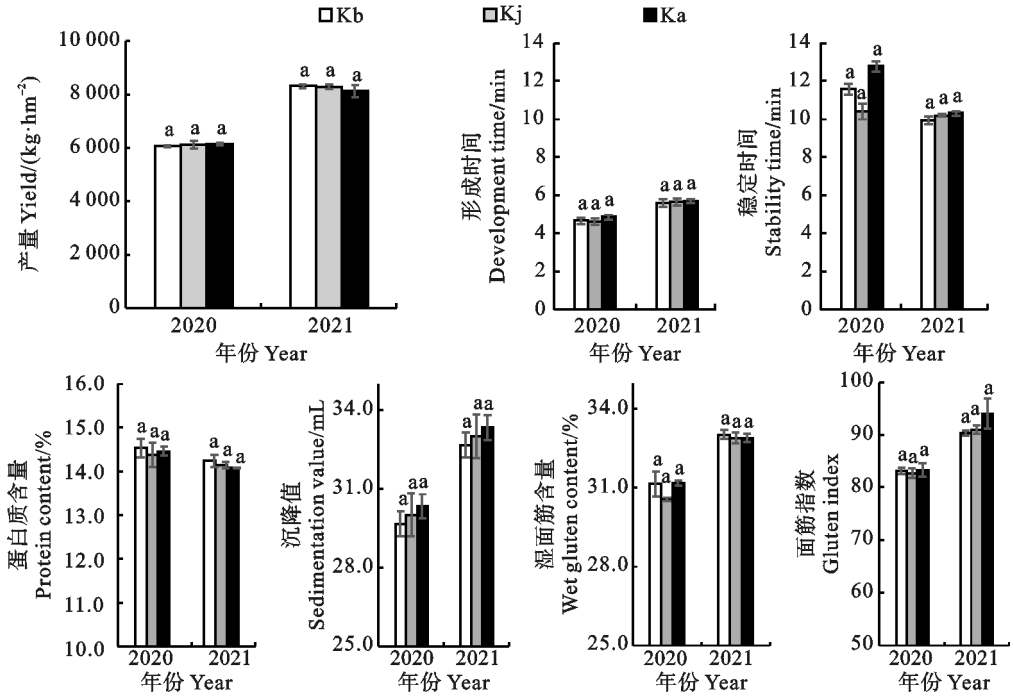
采用 Excel 整理数据、绘图,用 SPSS 2019 和 Duncan 法进行统计分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 施硫时期对强筋小麦产量的影响

2.1.1 试验可行性分析

在 2 个生长季,不施硫条件下,3 个施钾处理对藁优 2018 的产量、蛋白质含量、沉降值、湿面筋含量、面筋指数、形成时间和稳定时间的影响均不显著(图 1)。这说明在本试验条件下,不同时期施钾对小麦产量和被测品质指标均没有显著影响。因此,本试验以硫酸钾作为硫肥,研究不同施硫时期对小麦产量和品质的效应是可行的。



相同时间图柱上不同字母表示处理间差异在 0.05 水平显著。下同。

Different letters above columns of same time mean significant difference between treatment at 0.05 level. The same below.

图 1 施钾处理对强筋小麦产量和品质的影响

Fig. 1 Effect of potassium fertilization on yield and quality of strong-gluten wheat

2.1.2　施硫时期对小麦产量及构成因素的影响

由表 2 可知,2019－2020 小麦生长季,Sb 和 Sa 处理产量显著高于 CK;2020－2021,Sb、Sj 和 Sa 处理产量均显著高于 CK,2 年平均产量分别提高 9.20%、2.73%和 5.71%。施硫时期对千粒重影响显著,而对穗粒数和穗数影响不显著。2 个生长季,Sb 和 Sa 处理的千粒重均显著高于 CK,2 年平均增幅分别为 6.23%和 7.04%。这说明不同时期施硫都有利于产量和千粒重提高,底施和开花追施的增产效果较好。

表 2　不同施硫时期下小麦产量及其构成因素

Table 2　Yield and its components of wheat with different sulfur application stages

年度 Year	处理 Treatment	穗数 Ear number/(10^4 · hm^{-2})	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 Thousand kernel weight/g	产量 Yield/(kg · hm^{-2})	增产 Increased/%
2019－2020	Sb	800.00a	23.60a	43.62a	6 639.34a	8.72
	Sj	788.00a	23.53a	42.64b	6 213.23c	1.74
	Sa	794.00a	23.73a	43.72a	6 463.89b	5.85
	CK	787.00a	23.42a	41.71c	6 106.90c	0
2020－2021	Sb	751.17a	30.00a	45.39ab	9 039.90a	9.67
	Sj	744.23a	29.00a	44.73b	8 549.43b	3.72
	Sa	748.20a	29.13a	45.97a	8 701.92b	5.57
	CK	740.27a	29.80a	42.07c	8 242.62c	0

相同年度同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。CK 代表无硫施钾处理的平均值。下同。

Different lowercase letters following data within after the same column and year of data indicated significant differences among different treatments ($P<0.05$). The Same as below. CK represents the average value of the treatment with sulfur-free with potassium fertilization. The same in tables 3－5.

2.2　施硫时期对强筋小麦品质的影响

2.2.1　对粗蛋白含量的影响

2 个小麦生长季,随着灌浆进程的推进,籽粒粗蛋白含量持续上升,到花后 38 d 达到最高值(图 2)。花后 23～29 d,两个年度间比较,施硫时期对藁优 2018 粗蛋白质含量影响规律不一致;花后 32～38 d,两个年度均表现为 Sa 处理显著高于 CK,其中 Sa 处理花后 38 d 的 2 年增幅分别为 7.08%和 6.13%,平均增幅为 6.61%。由此说明开花期追施硫肥有利于提高灌浆后期(花后 32～38 d)籽粒蛋白质含量。

2.2.2　对蛋白组分含量的影响

由表 3 可知,施硫处理降低清球蛋白和醇溶蛋白含量,增加谷蛋白含量,进而谷醇比提高。其中 Sa 处理效应最大,谷蛋白含量和谷醇比均显著高于 CK,增幅分别为 5.69%、10.48%。由此说明施硫处理可以改善籽粒蛋白质组分占比,以开花期追施效果最明显。

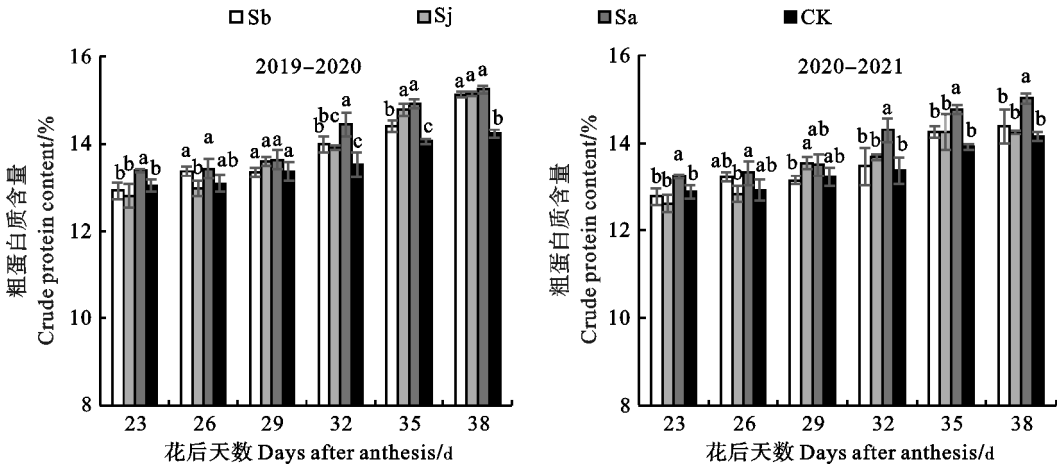


图 2　不同施硫时期下小麦籽粒粗蛋白质含量

Fig. 2　Crude protein content in grain of wheat with different sulfur application stages

表 3 不同施硫时期下小麦籽粒蛋白组分含量

Table 3 Grain protein components of wheat of different sulfur application stages

年度 Year	处理 Treatment	清球蛋白 Albumin+Globulin/%	醇溶蛋白 Gliadin/%	谷蛋白 Glutein/%	醇+谷 Gliadin+Glutein/%	谷醇比 Gliadin/Glutein
2019－2020	Sb	29.44bc	26.41ab	44.15ab	70.56ab	1.67ab
	Sj	29.68b	26.57ab	43.75b	70.32b	1.65bc
	Sa	29.00c	25.96b	45.04a	71.00a	1.74a
	CK	30.54a	26.97a	42.49c	69.46c	1.58c
2020－2021	Sb	30.55b	25.37a	44.08ab	69.45a	1.74b
	Sj	31.98a	24.80b	43.23bc	68.02b	1.74b
	Sa	31.11b	24.23c	44.66a	68.89a	1.84a
	CK	32.07a	25.55a	42.38c	67.93b	1.66c

2.2.3 对湿面筋及沉降值的影响

由表 4 可知，施硫处理均可增加湿面筋含量、面筋指数和沉降值。其中 Sa 处理的效应最大，与 CK 相比，Sa 处理上述 3 个指标 2 年平均增幅分别达到 8.88%、6.94%和 8.31%，差异均显著。这说明施硫有利于增强小麦面筋筋力，以开花期追施硫效果最佳。

2.2.4 对粉质参数的影响

由表 5 可知，2 个年度不同施硫处理均显著提高了面团形成时间和稳定时间。以 Sa 处理效应最大，其面团形成时间和稳定时间较 CK 增幅分别为 48.78%和 32.62%，差异均显著。这说明不同时期施硫有利于提高面团强度，开花期追施硫肥效果最佳。

表 4 不同施硫时期下小麦湿面筋含量及沉降值

Table 4 Wet gluten content and sedimentation value of wheat with different sulfur application stages

年度 Year	处理 Treatment	湿面筋 Wet gluten content/%	面筋指数 Gluten index	沉降值 Sedimentation/mL
2019－2020	Sb	33.63b	89.67b	32.17b
	Sj	33.11b	89.00b	31.00bc
	Sa	34.88a	91.67a	33.47a
	CK	30.97c	83.06c	30.00c
2020－2021	Sb	33.37c	95.33a	33.33b
	Sj	33.97b	93.33ab	34.00ab
	Sa	34.63a	95.00ab	34.67a
	CK	32.94c	91.78b	33.00b

表 5 不同施硫时期下小麦面粉粉质参数

Table 5 Flour quality parameters of wheat with different sulfur application stages

年度 Year	处理 Treatment	形成时间 Development time/min	稳定时间 Stability time/min
2019－2020	Sb	6.73a	11.35b
	Sj	6.27b	11.28b
	Sa	6.87a	11.82a
	CK	5.65c	10.15c
2020－2021	Sb	7.27a	17.40a
	Sj	6.90a	16.07a
	Sa	8.27a	17.23a
	CK	4.70b	11.58b

3　讨论

3.1　施硫对小麦产量的影响

氯是植物的必需营养元素,常规施肥所带入的氯离子对多数作物不会产生危害[15]。研究发现,土壤适应的氯离子浓度为 100.5～207.5 kg·hm^{-2}[16];长期(22 年)施用双氯化肥(氯化铵和氯化钾)可能会影响土壤生物肥力,从而降低了作物产量[17]。本试验在不同时期施入氯化钾 297.18 kg·hm^{-2} 以确定钾离子的效应,但没有考虑氯元素的效应,关于此浓度氯离子的危害性有待后续试验验证。前人关于硫肥对小麦产量效应的研究结果不尽相同[18-19]。研究发现,与对照相比,施硫量为 30～60 kg·hm^{-2} 时可提高小麦产量,穗数平均增加 15.3×10^4·hm^{-2},穗粒数平均增加 2.5 个,千粒重平均增加 0.9 g[20]。Järvan 等[21]和赵玉霞等[22]研究也表明,施硫能够显著提高小麦产量,但主要提高了穗数和穗粒数。沈学善等[23]研究指出,施硫主要是通过提高穗粒数和千粒重实现增产。本试验结果表明,施硫主要是通过提高千粒重实现增产,可能因为施硫可以提高小麦籽粒中淀粉合成及相关酶的活性,进而提高总淀粉积累量和千粒重[24]。

3.2　硫对小麦品质的影响

研究发现,施硫能显著提高小麦蛋白质含量[25-26]。本研究结果与其一致,施硫对灌浆前期籽粒粗蛋白含量影响较小,在灌浆后期显著提高。这可能是因为籽粒发育后期的水分含量下降,淀粉合成变缓,蛋白质占比显著上升[27]。

Järvan 等[28]研究发现,施硫对面筋指数、面团稳定时间和粉质参数有显著正向效应。田文仲等[29]研究发现,施硫能显著延长兰考矮早 8 和豫麦 49-198 面团的拉伸阻力和稳定时间,改善小麦品质。Yu 等[30]研究指出,与不施硫相比,小麦谷/醇比在施硫量为 30 kg·hm^{-2} 时显著提高。本研究发现,施硫可以显著提高面团湿面筋含量、面筋指数、沉降值、籽粒谷蛋白含量和谷醇比,与前人研究结果基本一致。

3.3　施硫时期对小麦产量和品质的效应

朱云集等[7]的研究表明,拔节追施 30 kg·hm^{-2} 的硫肥对小麦产量和品质效应最佳。本试验发现,播前、拔节期和开花期追施硫肥均可以提高小麦产量和品质,以开花期追施效果最佳。马春英等[31]研究表明,底施硫肥 60 kg·hm^{-2} 能够获得更高的小麦产量,其可能原因是底施能提高幼苗素质。硫酸盐经同化后可转化为谷胱甘肽[5],促进含硫蛋白质的合成[32]。Bonnot 等[33]报道,开花期施硫能够提高小麦蛋白品质,其原因可能是开花期是营养生长转向生殖生长的关键时期,施硫更易促进强筋小麦品种合成含硫氨基酸及蛋白质,提高湿面筋含量。本试验中,开花期施硫增产提质效果优于播前,可能开花期追施硫有利于小麦叶片吸收硫素后直接用于淀粉及蛋白的合成;拔节期施硫对产量和品质的效果不如底施和开花期施用好,具体原因还需要深入的探讨。

综上所述,在河北省强筋冬小麦种植区,建议在开花施用硫肥 60 kg·hm^{-2},可实现强筋小麦增产提质。

参考文献:

[1]ROMERO L C,ÁNGELES AROCA M,LAUREANO-MARÍN A M,*et al*. Cysteine and cysteine-related signaling pathways in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Molecular Plant*,2014,7(2):264.

[2]BOURANIS D L,DIONISIOS G,BERND Z,*et al*. The effect of granular commercial fertilizers containing elemental sulfur on wheat yield under mediterranean conditions [J]. *Plants*,2019,8:2.

[3]NAKAI Y,MARUYAMA-NAKASHITA A. Biosynthesis of sulfur-containing small biomolecules in plants [J]. *International Journal of Molecular Sciences*,2020,21(10):3470.

[4]SAITO K. Sulfur assimilatory metabolism. The long and smelling road [J]. *Plant Physiology*,2004,136(1):2443.

[5]LI Q,GAO Y,YANG A. Sulfur homeostasis in plants [J]. *International Journal of Molecular Sciences*,2020,21(23):8926.

[6]谢迎新,朱云集,郭天财,等.施用硫肥对冬小麦光合生理特性及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):407
XIE Y X,ZHU Y J,GUO T C,*et al*. Effects of sulphureous fertilization on photosynthetic and physiological characteristics and yields of winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2009,15(2):407.

[7]朱云集,谢迎新,谭金芳,等.砂土麦田追施硫肥对冬小麦产量和质量的影响[J].土壤通报,2005,36(5):723.
ZHU Y J,XIE Y X,TAN J F,*et al*. Effects of application of sulphur fertilizer on yield and quality of winter wheat in sand soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2005,36(5):723.

[8]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.

[9]王 丽,王 东,周 杰,等.氮硫互作对冬小麦旗叶衰老,产量和氮素利用效率的影响[J].土壤学报,2016,53(6):1476.
WANG L,WANG D,ZHOU J,*et al*. Interactive effects of nitrogen and sulfur on flag leaf senescence,yield and nitrogen use eficiency of winter wheat [J]. *Acta Pedologica Sinica*,2016,53(6):1476.

[10]陶莉敏,周 琴,蔡 剑,等.施硫时期对小麦颖果和胚乳发育的影响[J].南京农业大学学报,2018,41(3):402.
TAO L M,ZHOU Q,CAI J,*et al*. Effects of sulfur fertilizer application periods on caryopsis and endosperm development in wheat [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*,

2018,41(3):402.
[11]ZÖRB C,STEINFURTH D,SELING S,*et al*. Quantitative protein composition and baking quality of winter wheat as affected by late sulfur fertilization [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2009,57(9):3877.
[12]李朝英,郑 路. 流动分析仪同时测定土壤和植物全氮含量方法的改进[J]. 西南农业学报,2020,33(2):343.
LI C Y,ZHENG L. Optimization of determination method of total nitrogen content in soil and plant by flow analyzer at the same time [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2020,33(2):343.
[13]NEHE A S,MISRA S,MURCHIE E H,*et al*. Nitrogen partitioning and remobilization in relation to leaf senescence, grain yield and protein concentration in Indian wheat cultivars [J]. *Field Crops Research*,2020,251:107778.
[14]AMAGLIANI L,O'REGAN J,KELLY A L,*et al*. Composition and protein profile analysis of rice protein ingredients [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*,2017,59:22.
[15]邹长明,高菊生,王伯仁,等. 长期施用含氯化肥对水稻生长和养分吸收的影响[J]. 中国农学通报,2004,20(6):182.
ZOU C M,GAO J S,WANG B R,*et al*. Effects of long-term application of chlorine-containing chemical fertilizers on growth and nutrients absorption of rice [J]. *Chinese Agriculture Bulletin*,2004,20(6):182.
[16]蒋 增,韩晓日,杨劲峰,等. 长期施用含氯化肥对土壤养分和花生产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2011,42(2):204.
JAING Z,HAN X R,YANG J F,*et al*. Effects of application of long-term chlorine-containing fertilizers on peanut yield and soil nutrient [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*,2011,42(2):204.
[17]杨林生,张宇亭,黄兴成,等. 长期施用含氯化肥对稻-麦轮作体系土壤生物肥力的影响 [J]. 中国农业科学,2016,49(4):687.
YNAG L S,ZHANG Y T,HUANG X C,*et al*. Effects of long-term application of chloride containing fertilizers on the biological fertility of purple soil under a rice-wheat rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2016,49(4):687.
[18]任丽轩,帖建伟,胡 颖,等. 土壤供硫状况及小麦硫肥效应研究 [J]. 河南农业大学学报,1998,32(1):104.
REN L X,TIE J W,HU Y,*et al*. The soil sulphur status and response of wheat to sulphur fertilizer [J]. *Journal of Henan Agricultural University*,1998,32(1):104.
[19]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):47.
XIE Y X,ZHU Y J,GUO T C. Effect of different sulphur application on yield and quality of two spike type winter wheat cultivars [J]. *Journa lof Triticeae Crops*,2003,23(1):47.
[20]李玉影,刘双全. 硫对春小麦产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料,2004(1):14.
LI Y Y,LIU S Q. Effect of sulfur on the yield and quality of spring wheat [J]. *Soil and fertilizer Scinence in China*,2004(1):14.
[21]JÄRVAN M,EDESI L,ADAMSON A. Effect of sulphur fertilization on grain yield and yield components of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, *Section B—Soil & Plant Science*,2011:401.
[22]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.
ZHAO Y X,LI N,WANG W Y,*et al*. Effects of sulfur application rate on the absorption and translocation of nitrogen and sulfur and grain yield of winter wheat in Guanzhong area of Shaanxi [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,2013,19(6):1321.
[23]沈学善,朱云集,郭天财,等. 施硫对两种品质类型小麦光合物质积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(1):20.
SHEN X S,ZHU Y J,GUO T C,*et al*. Effects of sulfur application on accumulation and transportation of photoassimilate of two winter wheat cultivars with different gluten [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2008,14(1):20.
[24]王 东,于振文,王旭东,等. 硫营养对小麦籽粒淀粉合成及相关酶活性的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报,2003,29(5):440.
WANG D,YU Z W,WANG X D,*et al*. Effects of sulfur nutrition on starch synthesis and related enzymes activity in kernels of wheat [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*,2003,29(5):440.
[25]杨光梅,赵广才,刘利华,等. 硫肥对小麦蛋白质组分及产量的影响[J]. 土壤通报,2007,38(1):91.
YANG G M,ZHAO G C,LIU L H,*et al*. Sulphur effect on protein components and grain yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2007,38(1):91.
[26]赵首萍,胡尚连,李文雄,等. 硫对春小麦不同品质类型籽粒蛋白质含量的影响[J]. 东北农业大学学报,2003,34(4):363.
ZHAO S P,HU S L,LI W X,*et al*. Effect of sulfur on protein content in different quality types of spring wheat [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*,2003,34(4):363.
[27]李建敏,王振林,尹燕枰,等. 不同蛋白质含量小麦品种籽粒形成期氮代谢及相关酶活性的比较[J]. 中国农业科学,2009,42(9):3084.
LI J M,WANG Z L,YIN Y P,*et al*. Comparison of nitrogen metabolism and activities of the related enzymes during grain filling stage among wheat cultivars differing in protein content [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2009,42(9):3084.
[28]JÄRVAN M,LUKME L,ADAMSON A,*et al*. Responses of wheat yield,quality and bread-making properties on the sulphur fertilization [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*,*Section B—Soil & Plant Science*,2017,67(5):444.
[29]田文仲,朱云集,郭天财,等. 水分、硫肥及互作对小麦面团流变学及淀粉糊化特性的影响[J]. 中国粮油学报,2009,24(10):12.
TIAN W Z,ZHU Y J,GUO T C,*et al*. Effects of irrigation and sulphur fertilizer on flour rheological and paste parameters of wheat [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*,2009,24(10):12.
[30]YU Z T,SHE M Y,ZHENG T,*et al*. Impact and mechanism of sulphur-deficiency on modern wheat farming nitrogen-related sustainability and gliadin content [J]. *Communications Biology*,2021,4(1):945.
[31]马春英,李雁鸣,韩金玲. 不同施硫量对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(2):211.
MA C Y,LI Y M,HAN J L. Effects of different dose of sulfur fertilizer on photosynthetic characteristics and grain yield in winter wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2005,11(2):211.
[32]STEINFURTH D,ZÖRB C,BRAUKMANN F,*et al*. Time-dependent distribution of sulphur,sulphate and glutathione in wheat tissues and grain as affected by three sulphur fertilization levels and late S fertilization [J]. *Journal of Plant Physiology*,2012,169(1):72.
[33]BONNOT T,MARTRE P,HATTE V,*et al*. Omics data reveal putative regulators of einkorn grain protein composition under sulfur deficiency [J]. *Plant Physiology*,2020,183(2):501.