

孙敬国, 常怡飞, 郑小妹, 等. 硫肥用量对雪茄烟叶产量、品质及燃烧性能的影响[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(2): 170-176.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.017

## 硫肥用量对雪茄烟叶产量、品质及燃烧性能的影响

孙敬国<sup>1</sup>, 常怡飞<sup>2</sup>, 郑小妹<sup>2</sup>, 乔保明<sup>3</sup>, 樊友伦<sup>1</sup>,  
田辉文<sup>4</sup>, 陈涛<sup>4</sup>, 柴利广<sup>5</sup>, 翟霖顿<sup>2</sup>, 孙学成<sup>2</sup>

1. 湖北省烟草科学研究院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070;  
3. 湖北省烟草公司恩施州公司, 宣恩 445500; 4. 湖北省烟草公司襄阳市公司, 襄阳 441003;  
5. 湖北省烟草公司十堰市公司, 十堰 442012

**摘要** 为确定雪茄烟适宜的硫肥用量, 以茄芯品种楚雪 14(CX-14)为试验材料, 利用田间试验研究不同硫肥用量(0、60、120和180 kg/hm<sup>2</sup>)对雪茄烟生长农艺性状、产量、品质及燃烧性能的影响。结果显示, 与不施硫肥相比, 硫肥施用可提高生育期雪茄烟株高、最大叶宽、叶长、有效叶片数和SPAD值, 提高产量和上等烟率从而提高产值, 其中120 kg/hm<sup>2</sup>硫处理产量和产值最高, 60 kg/hm<sup>2</sup>硫处理上等烟率最高; 硫肥施用有提高雪茄烟叶总糖、还原糖、还原糖占比和粗蛋白含量的趋势, 进而有助于烟叶内在品质的提高; 与不施硫相比, 60 kg/hm<sup>2</sup>处理通过增加烟叶燃烧过程中的活化能, 降低烟叶燃烧起始温度, 减少灰分, 其最大热流率温度和总热释放量分别增加10.9%和6.3%, 燃烧过程中的频率因子减少43.7%, 从而提升了烟叶的燃烧性能。在本试验条件下, 雪茄烟叶适宜的硫肥用量为60 kg/hm<sup>2</sup>, 过量的硫肥施用(120和180 kg/hm<sup>2</sup>)虽然能增加雪茄烟叶的产量和经济效益, 但不利于烟叶燃烧性能的提升。因此, 在雪茄烟种植过程中, 可以考虑适当减少硫酸钾的施用, 而改用碳酸钾等钾肥替代, 以减少硫肥用量过大对烟叶燃烧性能以及土壤酸化的消极影响。

**关键词** 硫肥; 烤烟栽培; 雪茄; 烟叶品质; 燃烧性能

**中图分类号** S572; S143.7<sup>+</sup>1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0170-07

硫元素对烟株的生长至关重要<sup>[1]</sup>。众多研究表明, 硫元素与氮、钙、钾等矿质元素间存在协同效应, 在烟叶生产过程中配施硫肥, 有助于提高烟株对营养成分的吸收以及促进烟叶化学成分的合成, 从而提升烟叶产量, 改善烟叶品质<sup>[2-5]</sup>。烟叶硫素含量随硫肥用量的增加而升高, 二者表现出显著的正向关联性。缺硫的土壤不施硫肥, 烟叶品质会明显变差, 但过量施用硫肥也会导致烟叶产量和品质的整体下滑<sup>[6]</sup>。因此, 硫素缺乏或过高均会阻碍烤烟的产出, 而适度施用硫肥有助于促进烤烟的生长及干物质积累, 从而提升烤烟的总体产值, 提升农民的经济收入。

中国烤烟栽培中的钾素来源主要是硫酸钾肥<sup>[7]</sup>, 由于钾是烤烟重要的品质元素, 因此硫酸钾的用量一直居高不下, 硫的过量施用不仅加剧了土壤酸化, 也导致烟叶硫含量超标, 进而降低产量和品质。因

此, 对烟区而言, 确定合理的硫肥用量对雪茄烟栽培和生产具有重要的生产实践意义, 但迄今有关硫肥施用对雪茄烟叶的影响鲜有报道。为此, 本试验拟研究不同施硫量对雪茄生长和烟叶燃烧性能的影响, 以期合理施用硫肥、提高烟叶品质提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

田间试验于2022年4—8月在湖北省十堰市丹江口市习家店镇杏花村(111°10'57"E, 32°47'7"N; 海拔213 m)开展, 所用雪茄烟草(*Nicotiana tabacum* L.)为茄芯品种楚雪14号(CX-14), 土壤为黄棕壤。试验前土壤理化性质为: pH 6.77、有机质5.47 g/kg、碱解氮64.17 mg/kg、速效磷123.07 mg/kg、速效钾202.50 mg/kg、交换性钙和镁分别为253.12和35.35

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 湖北省烟草公司科技项目(027Y2022-022)

孙敬国, E-mail: sunjg596@hotmail.com

通信作者: 孙学成, E-mail: sxccn@mail.hzau.edu.cn

mg/kg,有效硫 30.13 mg/kg。按照 DB 34/T 2846—2017《硫肥合理施用技术规程》将 22~34 mg/kg 划分为中等水平,试验地土壤有效硫含量属于中等水平。

## 1.2 试验设计

采取随机区组试验,硫肥设置 4 个水平,分别为 0、60、120 及 180 kg/hm<sup>2</sup>(依次标记为 S<sub>0</sub>、S<sub>60</sub>、S<sub>120</sub> 和 S<sub>180</sub>,硫由硫酸钾提供)。各处理氮、磷、钾肥施用量均为 187.50、281.25、562.50 kg/hm<sup>2</sup>,氮肥来源为硝酸磷,磷肥来源为过磷酸钙,钾肥来源为供硫的硫酸钾肥(K<sub>2</sub>O 45%、S 17.5%),不足部分用 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 补充。

每个处理设 3 次重复,共计 12 个小区,每个试验小区长 6.75 m、宽 4.8 m,种植 4 垄共计 60 棵烟株,株行距为 0.4 m×1.1 m。所有肥料均 50% 基施(沟施)和 50% 追肥(团棵期,水溶灌根)。其他田间农事操作与调制管理均按当地优质雪茄烟叶生产技术规范统一进行。

烟叶从下部叶到上部叶依次采收,6月24日起每隔 7 d 左右采收 3 片或 4 片叶,采收时废弃最底部 2~3 片脚叶,采收后的烟叶放置在晾房中,按照《湖北省雪茄烟叶晾制技术规程》进行晾制,晾制完成后,每小区选取晾制后中部烟叶 1 kg,根据烟草行业标准 YC/T 31—1996《烟草及烟草制品试样的制备和水分测定 烘箱法》处理烟叶,用于烟叶化学成分含量及燃烧性能的测定。

## 1.3 检测项目及方法

1) 烟株农艺性状测定。根据烟草行业标准 YC/T 142—2010《烟草农艺性状调查测量方法》,分别于团棵期和圆顶期进行农艺性状的测定,每个小区测 3 株。

2) 烟叶矿质养分含量测定。H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消化,流动分析注射仪测定 N、P 含量,火焰光度计测定 K 含量;HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub>(4:1) 消化,原子吸收分光光度计(AAS)测定 Ca、Mg 含量,ICP-MS 测定 Fe、Mn、Cu、Zn、B、Mo 含量;硫酸钡比浊法测定 S 含量。

3) 烟叶化学成分测定。总糖及还原糖含量按 YC/T 159—2002《烟草及烟草制品水溶性糖的测定 连续流动法》测定;烟草淀粉含量按 YC/T 216—2007 烟草及烟草制品 淀粉的测定 连续流动法 测定;烟叶烟碱含量按 YC/T 160—2002《烟草及烟草制品总植物碱的测定 连续流动法》测定。

4) 烟叶燃烧性能指标测定。烟叶燃烧特性采用热重试验测试方法<sup>[8]</sup>进行测定。热重分析仪(TA-DSC)的测定条件为:高纯空气气氛(O<sub>2</sub> 21%,N<sub>2</sub>

79%),称取过孔径 0.42 mm 筛的样品 10 mg 于铂坩埚,以 20 °C/min 升温至 105 °C,恒温 10 min 后再以 30 °C/min 升温至 950 °C。得到样品质量随温度的变化曲线(TG 曲线),对该曲线进行一次微分,得到样品的燃烧图谱 DTG 曲线。根据 DTG 曲线,获得燃烧起始温度、外推终止温度、最大燃烧速率、最大燃烧速率温度、残余物质质量分数等燃烧特征参数。参照王安然<sup>[9]</sup>的热分析动力学方法,采用 Coats-Redfern 法对 DTG 曲线进行拟合。在烟叶燃烧过程中,第 II、III 阶段反应时间最长,反应最剧烈,可代表燃烧性能中大部分性能,故对此阶段的实验数据进行线性拟合分析,机理函数的选择主要遵循相关系数(R<sup>2</sup>)的绝对值接近于 1 的原则。参照王安然<sup>[9]</sup>的热分析动力学方法,用 Coats-Redfern 法对其进行拟合,发现本研究所有雪茄烟叶样品与三维扩散机理函数(D3)的拟合度最佳,确定本研究所用积分形式为  $[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$ ,烟叶的相关系数绝对值均大于 0.96。

5) 烟叶产量及经济性状测定。烟叶成熟后,从下至上依次进行采收,分小区编竿上架进行统一晾制,晾制完成后平衡烟叶水分,参照 DB42/T 1549—2020《雪茄烟叶等级质量规范》对各处理烟叶进行分级计产,统计小区茄衣、茄套、茄芯各等级烟叶产量,并根据 2022 年湖北省雪茄烟叶收购价格进行烟叶产值的计算。

## 1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理,IBM Statistics SPSS 20.0 进行统计分析,Duncan's 法进行差异显著性检验(P<0.05),Origin 2022 进行绘图。

# 2 结果与分析

## 2.1 施硫对雪茄烟叶农艺性状的影响

由表 1 可见,施硫显著提高成熟期烟叶的 SPAD 值(P<0.05),并有提高团棵期和成熟期烟株株高,叶片的最大叶宽、最大叶长、有效叶片数及茎围的趋势。在团棵期,与 S<sub>0</sub> 相比,施硫提高株高 4.46%~10.21%、最大叶宽 0.34%~3.13%、最大叶长 0.14%~1.72%、有效叶片数 2.00%~4.00%,其中以 S<sub>180</sub> 处理下的烟叶农艺性状最佳;在成熟期,与 S<sub>0</sub> 相比,除烟叶的株高、有效叶片数等农艺性状表现出随施硫水平的提高呈现先升后降的趋势外,施硫提高了烟叶的其他农艺性状参数。

表1 不同施硫量下雪茄烟叶农艺性状

Table 1 Agronomic properties of cigar tobacco under different sulfur application rates

时期 Period	处理 Treatment	株高/cm Plant height	最大叶宽/cm Max blade width	最大叶长/cm Max leaf length	有效叶片数 Number of leaves	SPAD值 SPAD value	茎围/cm Stem circumference
团棵期 Cluster stage	S <sub>0</sub>	28.02±0.48a	17.56±0.53a	27.90±0.78a	10.0±0.2a	46.35±0.83a	
	S <sub>60</sub>	29.45±1.17a	17.62±0.28a	28.24±0.56a	10.4±0.3a	46.41±0.45a	
	S <sub>120</sub>	29.27±0.74a	18.05±0.31a	27.94±0.62a	10.2±0.3a	47.05±0.73a	
	S <sub>180</sub>	30.88±0.86a	18.11±0.20a	28.38±0.29a	10.4±0.1a	46.29±0.70a	
成熟期 Maturation stages	S <sub>0</sub>	114.44±1.97a	28.67±0.51ab	51.78±1.60a	18.8±0.2a	53.32±0.03c	8.48±0.16a
	S <sub>60</sub>	114.22±1.74a	27.78±0.11b	49.78±0.45a	19.0±0.2a	55.06±0.33b	8.48±0.06a
	S <sub>120</sub>	117.22±2.39a	28.45±0.40ab	51.78±0.55a	19.2±0.3a	56.12±0.03a	8.62±0.20a
	S <sub>180</sub>	116.22±2.70a	29.67±0.84a	52.44±0.21a	19.0±0.6a	55.31±0.42ab	8.87±0.21a

## 2.2 施硫对雪茄烟叶产量与经济效益的影响

硫肥的施用整体表现出促进雪茄烟叶产量增加的趋势,其中以S<sub>120</sub>产量最高,较S<sub>0</sub>增产16.35%。同时与S<sub>0</sub>相比,硫肥的施用在一定程度上提高了雪茄

上等烟率和均价,增幅分别为16.21%~20.16%和16.32%~21.67%,使得烟叶的产值增加3万~4.6万元/hm<sup>2</sup>(表2)。

表2 不同施硫量对雪茄烟的产量与经济效益的影响

Table 2 Effects of different sulfur application rates on yield and output of cigar tobacco leaves

处理 Treatment	产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	产值/(万元/hm <sup>2</sup> ) Output value	均价/(元/kg) Average price	上等烟率/% Superior smoke rate
S <sub>0</sub>	1 521.4	11.1	72.9	25.3
S <sub>60</sub>	1 606.5	14.1	87.8	30.4
S <sub>120</sub>	1 770.2	15.7	88.7	29.4
S <sub>180</sub>	1 683.7	14.3	84.8	30.3

## 2.3 施硫对雪茄烟叶养分吸收的影响

由表3可见,硫肥施用在提高烟叶S含量的同时,也提高烟叶N、P、Ca、Mg、Mn、Cu、B含量,降低K、Fe的含量,其中Ca、Mg含量随硫施用量增加呈先增加后降低的趋势,在S<sub>60</sub>和S<sub>120</sub>时达到最高。其中,与S<sub>0</sub>相比,S<sub>180</sub>处理烟叶的N、P、S、B、Mn、Cu、Zn和Mo含量最高,分别增加了11.59%、31.41%、

15.89%、19.26%、35.05%、28.20%、0.20%和10.00%;S<sub>60</sub>处理烟叶的Mg含量和S<sub>120</sub>处理的Cu和Ni含量最高,分别增加了4.31%、4.97%和64.62%。说明硫肥处理总体上能促进各种矿质养分含量的增加,Fe含量降低可能与Mn含量增加竞争性抑制了对Fe的吸收、K含量降低可能与用碳酸钾肥进行钾补充有关。

表3 不同施硫量对雪茄烟叶矿质养分含量的影响

Table 3 Effects of different sulfur application rates on the mineral nutrient contents of cigar tobacco leaves

处理 Treatment	N/ (g/kg)	P/ (g/kg)	K/ (g/kg)	Ca/ (g/kg)	Mg/ (g/kg)	S/ (g/kg)	B/ (mg/kg)	Mn/ (mg/kg)	Fe/ (mg/kg)	Ni/ (mg/kg)	Cu/ (mg/kg)	Zn/ (mg/kg)	Mo/ (mg/kg)
S <sub>0</sub>	14.75a	1.56b	48.30a	31.78a	3.94bc	3.84b	39.00b	44.48c	506.55a	2.77bc	9.29b	24.52a	0.20a
S <sub>60</sub>	14.58a	1.89a	44.55ab	33.07a	4.11a	4.37a	36.04b	39.74d	424.24d	2.60c	8.53c	22.18a	0.21a
S <sub>120</sub>	16.45a	1.83ab	43.66b	33.36a	4.05ab	4.45a	31.98c	52.03b	454.74b	4.56a	11.88a	22.28a	0.22a
S <sub>180</sub>	16.46a	2.05a	43.39b	28.97b	3.80c	4.45a	46.51a	60.07a	437.83c	3.00b	11.91a	24.57a	0.22a

由表4可见,施硫整体上表现为提高烟叶总糖、还原糖、还原糖占比和粗蛋白质的含量,与S<sub>0</sub>相比,S<sub>120</sub>和S<sub>180</sub>增加了烟叶中非烟碱氮含量与占比及氮碱比。其中S<sub>60</sub>处理的烟叶中烟碱、总糖和淀粉的含量最高,与S<sub>0</sub>相比分别增加了2.10%、20.00%和9.10%;S<sub>120</sub>处理的烟叶中还原糖、粗蛋白质、非烟碱氮含量最高,与S<sub>0</sub>相比上升40.00%、47.76%和

50.00%。总体上说明硫肥的施用有助于雪茄烟叶内在品质的提升。

## 2.4 施硫对雪茄烟叶燃烧性能的影响

烟叶燃烧过程可分为3个失重阶段,其中第I阶段(110℃前)被视为是水分逸出阶段,主要为烟叶内部的游离水以及束缚水的蒸发;第II阶段在110~400℃附近,在此区间内,烟叶中组分经历了一系列

表 4 不同施硫量对雪茄烟叶化学成分的影响

Table 4 Effects of different sulfur application rates on the chemical composition of cigar tobacco leaves

处理 Treatment	烟碱/% Nicotine	总糖/% Total sugar	还原糖/% Reducing sugar	淀粉/% Starch	粗蛋白质/% Crude protein	非烟碱氮/% Non nicotine nitrogen	非烟碱氮/总氮 Non nicotine nitrogen ratio	氮碱比 Nitrogen to nicotine ratio	两糖比 Ratio of two sugars
S <sub>0</sub>	6.67b	0.50c	0.20b	0.11a	2.01a	0.32a	0.22a	0.22ab	0.40a
S <sub>60</sub>	6.81a	0.60a	0.27a	0.12a	1.76a	0.28a	0.19a	0.21b	0.45a
S <sub>120</sub>	6.77ab	0.58ab	0.28a	0.10a	2.97a	0.48a	0.29a	0.24a	0.48a
S <sub>180</sub>	6.78ab	0.53bc	0.23ab	0.12a	2.96a	0.47a	0.29a	0.24a	0.43a

复杂的分解与重组反应,初期阶段以释放低分子质量且易挥发的物质为主,随后是纤维素、半纤维素和木质素等组分相继分解,并伴随可挥发组分的燃烧;第Ⅲ阶段在 400~520 °C 附近,此时热解反应速率显著提升,形成的焦炭物质与氧气发生强烈化学反应,产生大量的二氧化碳和水蒸气。采用同步热分析仪(TA-DSC)研究硫肥用量对烟叶热解特性的影响, TG 和 DTG 曲线结果显示,不同硫肥用量烟叶样品的热分解过程相似(图 1)。

由 TG 和 DTG 曲线获得烟叶燃烧特征参数失重率、最大失重速率、最大失重速率温度、灰分含量并

计算燃烧起始温度(表 5),其中烟叶的品质随失重率、最大失重速率、最大失重速率温度的升高以及灰分含量和燃烧起始温度的降低而升高。随着硫肥用量的增加,烟叶灰分含量呈先减少后增加的趋势,烟叶燃烧第Ⅱ、Ⅲ阶段的失重率变化不大。其中 S<sub>60</sub> 提高了第Ⅱ阶段最大失重速率和降低燃烧起始温度及减少灰分,与 S<sub>0</sub> 相比, S<sub>60</sub> 处理的灰分含量降低了 13.30%,同时 S<sub>120</sub> 和 S<sub>180</sub> 灰分含量也降低,但燃烧起始温度提高了,说明只有 S<sub>60</sub> 有促进烟叶燃烧性能提高的效果。

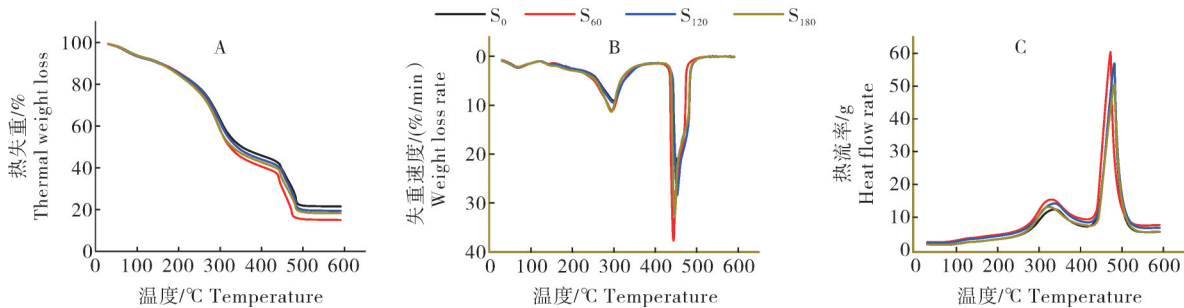


图 1 不同施硫量雪茄烟叶的 TG(A)、DTG(B)和热流率曲线(C)

Fig. 1 Effects of different sulfur application rates on the TG (A), DTG (B) and heat flow rate (C) of cigar tobacco leaves

表 5 不同施硫量对雪茄烟叶的热解特性参数的影响

Table 5 Effects of different sulfur application rates on chemical composition of cigar tobacco leaves

处理 Treatment	第Ⅱ阶段 Phase II			第Ⅲ阶段 Phase III			总失重率/% Total weight loss	燃烧起始温度/°C Combustion initial temperature	灰分/% Ash content
	失重率/% Weight loss ratio	最大失重速率/(%/min) Max weight loss rate	最大失重速率温度/°C Max weight loss rate temperature	失重率/% Weight loss ratio	最大失重速率/(%/min) Max weight loss rate	最大失重速率温度/°C Max weight loss rate temperature			
S <sub>0</sub>	48.9	10.6	295.1	23.6	32.0	441.2	72.48	150.5	19.6
S <sub>60</sub>	48.8	11.1	296.5	23.7	32.0	441.2	72.44	148.6	17.0
S <sub>120</sub>	48.8	9.4	296.4	23.7	28.4	453.6	72.47	155.8	19.4
S <sub>180</sub>	48.9	11.3	294.3	23.0	32.6	446.7	71.96	152.8	18.3

由热流率曲线图(图 1)和热流率曲线参数(表 6)可知,随着硫肥用量的增加,烟叶燃烧的最大热流率和总热释放量呈先升高后降低的趋势,而最大热流

率温度呈先降低后升高的趋势(表 6), S<sub>60</sub> 烟叶的最大热流率和总热释放量均最大,最大热流率温度最低,与 S<sub>0</sub> 相比, S<sub>60</sub> 最大热流率和总热释放量分别增加了

10.9%和6.3%;而 $S_{120}$ 和 $S_{180}$ 烟叶最大热流率温度高于 $S_0$ ,总热释放量低于 $S_0$ ,对烟叶燃烧产生不利影响,说明 $S_{60}$ 烟叶燃烧更充分。

用Coats-Redfern法对烟叶燃烧过程进行拟合,推算不同处理下雪茄烟叶燃烧反应的活化能和频

率因子(表6),结果表明,硫肥的施用增加烟叶的活化能( $E$ ),降低了频率因子( $A$ )。其中,在各施硫处理中, $S_{60}$ 处理的烟叶具有最高的活化能和最低的频率因子,说明 $S_{60}$ 处理有利于提高烟叶的燃烧性能。

表6 不同施硫量对雪茄烟叶热流率曲线参数及热分析动力学拟合参数的影响

Table 6 Effects of different sulfur application rates on parameters of heat flow curve and dynamic fitting parameters of thermal analysis of cigar tobacco leaves

处理 Treatment	热流率曲线参数 Parameters of heat flow curve			热分析动力学拟合参数 Dynamic fitting parameters of thermal analysis			
	最大热流率/g Max heat flow rate	最大热流率温度/°C Max heat flow rate temperature	总热释放量/(J/g) Total heat release	拟合方程 Fitting equation	$R^2$	$E /$ (kJ/mol)	$A/s$
$S_0$	54.4	475.8	2 594.0	$y = -3939.2x - 9.31$	0.97	32.8	$8.7 \times 10^8$
$S_{60}$	60.4	472.1	2 757.8	$y = -4190.1x - 8.48$	0.96	34.8	$4.9 \times 10^8$
$S_{120}$	56.9	481.7	2 474.9	$y = -3969.5x - 9.18$	0.96	33.0	$7.7 \times 10^8$
$S_{180}$	50.7	481.5	2 400.7	$y = -4074.4x - 8.98$	0.95	33.9	$6.5 \times 10^8$

### 3 讨论

#### 3.1 适量施用硫肥能提高雪茄烟叶产量、品质和经济效益

硫元素对于烟株的生长至关重要,缺硫土壤增施硫肥可提高烟叶叶绿素含量,提高叶片对光能的利用效率<sup>[10]</sup>,促进烤烟的光合作用<sup>[11]</sup>,改善烟叶的颜色、成熟度、叶片结构等外观质量<sup>[12]</sup>。本研究结果表明,施硫提高雪茄烟的SPAD值及株高、叶片的最大叶宽、最大叶长、有效叶片数和茎围等,说明烟叶施硫通过促进叶片叶绿素合成和植株的生长,提高雪茄烟叶还原糖占比等内在品质指标,从而促进产量和上等烟率的增加,提高烟叶的经济效益。本研究中, $S_{60}$ 通过增加烟叶燃烧过程中的活化能,降低烟叶燃烧起始温度和最大热流率温度、减少灰分,增加最大热流率和总热释放量,从而提升烟叶的燃烧性能。但 $S_{120}$ 和 $S_{180}$ 有降低雪茄烟叶燃烧性能趋势,与皖南烟区过量硫肥施用对烤烟的经济性状态会产生不利影响的试验结果<sup>[13]</sup>一致。本研究结果表明,在本试验条件下雪茄烟叶适宜的硫肥施用水平为60 kg/hm<sup>2</sup>,过量的硫肥施用水平虽然能增加雪茄烟叶的产量和经济效益,却不利于烟叶燃烧性能的提升。

#### 3.2 长期施用单一硫酸钾肥不利于雪茄烟叶的燃烧性能

烟叶中各化学成分含量是否协调能显著影响烟叶品质的优劣,烟叶的硫含量能显著影响烟叶刺激性、燃烧性能等感官品质<sup>[14]</sup>,硫肥过量施用,烟叶中硫素和含硫氨基酸含量失衡,阻碍碳水化合物化合物的积累,降低烟叶中总糖和还原糖含量,增加烟碱含

量,严重影响烟叶品质<sup>[15]</sup>。云贵两地烤烟试验结果表明,烟叶中硫素含量与烟碱、施木克值、糖类及感官质量总分存在明显的负相关<sup>[16]</sup>。有效硫含量水平较低的土壤中适量施用硫肥,可明显促进烟株的生长,提高烟叶的产值,改善烟叶的品质和燃烧性能;但若硫肥施用过量,会明显抑制烟株的生长,降低烟叶的产量和品质<sup>[17-18]</sup>。硫素在烟叶中既可以还原成含硫化合物,又可以阻碍钾与有机酸的结合,使得含硫化合物含量增加,有机结合钾含量降低,烟叶的燃烧性能因此变差<sup>[19]</sup>,若烟叶中硫素含量超过0.67%这一临界值,烟叶的燃烧性能会逐渐变差<sup>[20]</sup>。本研究中 $S_{60}$ 能提升烟叶的燃烧性能而 $S_{120}$ 和 $S_{180}$ 却有降低雪茄烟叶燃烧性能趋势,按照硫酸钾肥中硫的含量18%计, $S_{60}$ 的 $K_2O$ 用量为173 kg/hm<sup>2</sup>,而雪茄烟叶实际生产中 $K_2O$ 用量为562.5 kg/hm<sup>2</sup>,因烟叶为忌氯作物,生产中所用钾肥基本为硫酸钾而不是氯化钾,其所带入的硫用量达194.7 kg/hm<sup>2</sup>,远高于60 kg/hm<sup>2</sup>的适宜硫施用量。所以在雪茄烟种植过程中,可以考虑适当减少硫酸钾肥的施用,而改用碳酸钾等钾肥替代,以减少硫肥用量过大对烟叶燃烧性能以及土壤酸化的消极影响。

综上所述,在本试验条件下,雪茄烟叶适宜的硫肥用量为60 kg/hm<sup>2</sup>,过量的硫肥施用(120和180 kg/hm<sup>2</sup>)虽然能增加雪茄烟叶的产量和经济效益,但不利于烟叶燃烧性能的提升。基于本研究试验处理和本烟区土壤条件的前提下,适量施用硫肥可提高生育期雪茄烟株农艺性状、产量、上等烟率和产值,提高雪茄烟叶总糖、还原糖、还原糖占比和粗蛋白质

含量以及烟叶内在品质,增加烟叶燃烧过程中的活化能、最大热流率温度和总热释放量,降低烟叶燃烧起始温度和减少灰分,提升烟叶的燃烧性能。

## 参考文献 References

- [1] 许自成,王林,肖汉乾,等. 湖南烟区烤烟硫含量与土壤有效硫含量的分布特点[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2507-2511. XU Z C, WANG L, XIAO H Q, et al. Distribution characters of sulfur in flue-cured tobacco leaf and available sulfur in soil in Hunan tobacco-growing areas[J]. Chinese journal of applied ecology, 2007, 18(11): 2507-2511 (in Chinese with English abstract).
- [2] 孟赐福,姜培坤,曹志洪,等. 硫素与其他营养元素的交互作用对作物养分吸收、产量和质量的影响[J]. 土壤, 2009, 41(3): 329-334. MENG C F, JIANG P K, CAO Z H, et al. Interaction effects of sulfur and other nutrients on nutrient uptakes, yields, and qualities of crops[J]. Soils, 2009, 41(3): 329-334 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李玉梅,徐茜,熊德忠. 不同硫肥用量对烤烟产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 171-174. LI Y M, XU Q, XIONG D Z. Effects of sulfur fertilizer content on yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2005, 21(2): 171-174 (in Chinese with English abstract).
- [4] 杨波,吴元华,董建新,等. 不同硫酸钾用量对烤烟氮、钾、硫吸收的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 116-119. YANG B, WU Y H, DONG J X, et al. Effects of different dosages of potassium sulfate on the uptake of nitrogen, potassium and sulfur in roasted tobacco[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2015, 43(4): 116-119 (in Chinese).
- [5] 刘勤,赖辉比,曹志洪. 不同供硫水平下烟草硫营养及对N、P、Cl等元素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 63-68. LIU Q, LAI H B, CAO Z H. Effect of sulphate rates supplied on sulphur metabolism and N, P and Cl absorption in tobacco[J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2000, 6(1): 63-68 (in Chinese with English abstract).
- [6] 蔡赛男,周冀衡,张毅,等. 不同硫肥施用量对烤烟生长和生理生化指标的影响[J]. 作物研究, 2015, 29(2): 170-172. CAI S N, ZHOU J H, ZHANG Y, et al. Effect of different application rate of sulfur fertilizer on growth and physiological and biochemical indexes of tobacco[J]. Crop research, 2015, 29(2): 170-172 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王国平,向鹏华,曾惠宇,等. 不同供硫水平对烟叶产、质量的影响[J]. 作物研究, 2009, 23(1): 35-37. WANG G P, XIANG P H, ZENG H Y, et al. Effect of different sulphur application rates on leaf yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Crop research, 2009, 23(1): 35-37 (in Chinese with English abstract).
- [8] 叶仲力,李茂毅,梁晖,等. 基于热重分析的再造烟叶热稳定性评价方法研究与应用[J]. 中国烟草学报, 2025, 31(1): 76-84. YE Z L, LI M Y, LIANG H, et al. Research and application of thermal stability evaluation method of reconstituted tobacco based on thermogravimetric analysis[J]. China industrial economics, 2025, 31(1): 76-84 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王安然. 雪茄燃烧状态表征及烟叶热解燃烧特性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2021. WANG A R. Characterization of cigar combustion state and study on pyrolysis and combustion characteristics of tobacco leaf[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [10] 马友华,丁瑞兴,张继榛,等. 硒和硫配施对烟草叶绿素及保护酶活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 1999, 22(4): 109-111. MA Y H, DING R X, ZHANG J Z, et al. The effect of selenium and sulfur combined application on tobacco chlorophyll and protective enzyme activity[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1999, 22(4): 109-111 (in Chinese with English abstract).
- [11] 蔡海洋,李玉梅,熊德忠. 不同硫肥用量对烤烟光合作用和产量的影响[J]. 亚热带农业研究, 2009, 5(3): 155-158. CAI H Y, LI Y M, XIONG D Z. Effects of sulfur fertilizer content on photosynthesis and yield of flue-cured tobacco[J]. Subtropical agriculture research, 2009, 5(3): 155-158 (in Chinese with English abstract).
- [12] 齐凌峰,赵姜波,季舜华,等. 不同施硫量和硫素营养水平土壤对烟叶质量的影响[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(9): 34-39. QI L F, ZHAO X B, JI S H, et al. Effects of different sulfur application rates and sulfur nutrient levels on the quality of tobacco leaves in soil[J]. Anhui agricultural science bulletin, 2024, 30(9): 34-39 (in Chinese with English abstract).
- [13] 崔权仁,姜超强,武文明,等. 皖南烟区硫肥适宜用量及其对烤烟品质的影响研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(26): 40-46. CUI Q R, JIANG C Q, WU W M, et al. Optimum sulphur rate and its impact on flue-cured tobacco quality in southern Anhui[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2019, 35(26): 40-46 (in Chinese with English abstract).
- [14] 丁伟. 贵州植烟土壤硫素特征研究与含硫肥料施用探讨[J]. 中国烟草科学, 2002, 23(1): 14-15. DING W. Sulfur content in tobacco planting soils in Guizhou and recommendation of sulfur fertilizer application[J]. Chinese tobacco science, 2002, 23(1): 14-15 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张晓海,王绍坤. 利用<sup>35</sup>S研究烤烟对S的吸收分配与再分配[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2001, 16(2): 64-69. ZHANG X H, WANG S K. Study of S uptake partitioning and redistribution in roasted tobacco using <sup>35</sup>S[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (natural science), 2001, 16(2): 64-69 (in Chinese with English abstract).
- [16] 宾柯,周清明,杨虹琦,等. 烟草硫素营养研究现状与展望[J]. 作物研究, 2007, 21(B12): 719-721. BIN K, ZHOU Q M, YANG H Q, et al. Research status and prospect of nutritional studies on tobacco sulfur[J]. Crop research, 2007, 21(B12): 719-721 (in Chinese with English abstract).
- [17] 张雅杰,朱金峰,黄海棠,等. 水硫互作对烤烟叶片生理生化指标和化学成分的影响[J]. 节水灌溉, 2015(7): 9-13. ZHANG Y J, ZHU J F, HUANG H T, et al. Effects of interactions between irrigation and sulphur on physiological and bio-

- chemical indices and chemical components in flue-cured tobacco[J]. *Water saving irrigation*, 2015(7): 9-13 (in Chinese with English abstract).
- [18] 沈少君, 杜超凡, 杨志杰, 等. 有机肥与硫肥平衡配施对烤烟品质的影响[J]. *中国烟草科学*, 2009, 30(2): 36-40. SHEN S J, DU C F, YANG Z J, et al. Effects of balanced application of organic and sulfur fertilizers on flue-cured tobacco quality[J]. *Chinese tobacco science*, 2009, 30(2): 36-40 (in Chinese with English abstract).
- [19] 孙计平, 李雪君, 孙焕, 等. 烟草减害降焦研究进展[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(1): 11-15. SUN J P, LI X J, SUN H, et al. Advances of tobacco relieve harm and reduce tar[J]. *Journal of Henan agricultural sciences*, 2012, 41(1): 11-15 (in Chinese with English abstract).
- [20] 刘勤, 曹志洪. 烟草硫素营养与烟叶品质研究进展[J]. *土壤*, 1998, 30(6): 320-323. LIU Q, CAO Z H. Research advances in tobacco sulfur nutrition and tobacco leaf quality[J]. *Soils*, 1998, 30(6): 320-323 (in Chinese).

## Effects of sulphur fertilizer dosage on yield, quality, and combustion performance of cigar tobacco leaves

SUN Jingguo<sup>1</sup>, CHANG Yifei<sup>2</sup>, ZHENG Xiaomei<sup>2</sup>, QIAO Baoming<sup>3</sup>, FAN Youlun<sup>1</sup>,  
TIAN Huiwen<sup>4</sup>, CHEN Tao<sup>4</sup>, CHAI Liguang<sup>5</sup>, ZHAI Lindun<sup>2</sup>, SUN Xuecheng<sup>2</sup>

1. *Hubei Academy of Tobacco Sciences, Wuhan 430070, China;*

2. *College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;*

3. *Enshi Branch of Hubei Tobacco Company, Xuanen 445500, China;*

4. *Xiangyang Branch of Hubei Tobacco Company, Xiangyang 441003, China;*

5. *Shiyan Branch of Hubei Tobacco Company, Shiyan 442012, China*

**Abstract** Cigar-filler variety Chuxue 14 (CX-14) was used to conduct a field experiment to study the effects of sulfur fertilizer dosages including 0, 60, 120 and 180 kg/hm<sup>2</sup> on the agronomic traits, yield, quality and combustion performance of cigar tobacco. The results showed that the plant height, maximum leaf width, leaf length, effective leaf number, and SPAD value of cigar tobacco during the period of growth, the yield and the rate of superior tobacco under applying sulfur fertilizer was increased compared with no sulfur application, thus the output value of cigar tobacco was increased as well. Among them, the yield and output value were highest under 120 kg/hm<sup>2</sup> sulfur application, and the rate of superior tobacco was highest under 60 kg/hm<sup>2</sup> sulfur application. The application of sulfur fertilizer tended to increase the content of total sugar, reducing sugar, and crude protein, the proportion of reducing sugar in cigar tobacco leaves, which in turn helped to improve the intrinsic quality of tobacco leaves. Compared with no sulfur application, the 60 kg/hm<sup>2</sup> sulfur application increased the activation energy during tobacco combustion, lowered the initial temperature of tobacco combustion, and reduced the content of ash. The maximum heat flux temperature and total heat release increased by 10.9% and 6.3%, respectively, and the frequency factor during combustion decreased by 43.7%, thereby improving the combustion performance of tobacco leaves. It is indicated that the appropriate sulfur fertilizer dosage for cigar tobacco leaves was 60 kg/hm<sup>2</sup> under the conditions of this experiment. Excessive application of sulfur fertilizer including 120 kg/hm<sup>2</sup> and 180 kg/hm<sup>2</sup> can increase the yield and economic benefits of cigar tobacco leaves, but it is not conducive to improving the combustion performance of tobacco leaves. Therefore, it is possible to consider reducing the application of potassium sulfate fertilizer appropriately in the process of planting cigar and replacing it with potassium carbonate and other potassium fertilizers to reduce the negative effects of excessive sulfur fertilizer on the combustion performance of tobacco and soil acidification.

**Keywords** sulfur fertilizer; tobacco cultivation; cigar tobacco; quality of tobacco leaves; combustion performance

(责任编辑: 张志钰)