

阳苇丽,吴永兵,陈泳纬,等. 垄高与分次施钾互作对雪茄烟叶光合特性、组织结构及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(12):80-88.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.12.011

# 垄高与分次施钾互作对雪茄烟叶光合特性、组织结构及品质的影响

阳苇丽<sup>1</sup>, 吴永兵<sup>2</sup>, 陈泳纬<sup>2</sup>, 袁华恩<sup>2</sup>, 管庆林<sup>2,3</sup>, 何正川<sup>1</sup>, 李文刚<sup>4</sup>, 杨吉光<sup>1</sup>, 刘 扬<sup>1</sup>, 赵铭钦<sup>2</sup>

(1. 四川省烟草公司达州市公司, 四川达州 635711; 2. 河南农业大学烟草学院/国家烟草栽培生理生化研究基地/烟草行业烟草栽培重点实验室, 河南郑州 450046; 3. 浙江中烟工业有限责任公司, 浙江杭州 310004; 4. 中国烟草总公司四川省公司, 四川成都 610041)

**摘要:**以川雪 1 号为试验材料,以 3 个垄高水平(A1:高垄 35 cm、A2:中垄 30 cm、A3:低垄 25 cm)为主区,以 3 种施钾模式(分 1 次施钾、分 2 次施钾、分 3 次施钾)为副区,进行大田裂区试验,共设置 9 个不同的垄高与施钾模式组合处理,在旺长期和成熟期测量分析不同组合雪茄烟叶的光合特性、组织结构以及调制后烟叶的化学成分、外观质量,以期筛选出适宜四川优质雪茄烟叶生长发育的垄高与施钾模式组合,提高烟叶品质。结果表明,旺长期,高、中垄烟叶和低垄烟叶光合有效辐射( $PAR$ )、净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )随施钾次数增加分别渐降和渐升,A2B1 处理对烟叶光合特性的改善作用最为显著,A2B1 处理  $P_n$  最高,为  $18.79 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;成熟期时除 A3B1、A3B2、A3B3 处理外,各处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  随垄高和施钾次数增加均渐升,以 A1B3、A2B3 处理烟叶光合特性的改善最为显著,A1B3、A2B3 处理烟叶  $P_n$  较高,分别为  $27.07$ 、 $25.43 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。旺长期时,高、中垄下烟叶叶片厚度、栅栏和海绵组织厚度、栅海比及上下表皮厚度均以 1 次施钾处理最高,低垄下除栅海比外均以 3 次施钾处理较高,各处理烟叶组织厚度整体以中垄较低;成熟期时各处理烟叶叶片厚度、栅栏和海绵组织厚度及栅海比随施钾次数基本渐升且整体以高垄处理烟叶较高,以 A1B3 和 A2B3 处理烟叶组织较疏松且发育较好,叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、上表皮厚度、下表皮厚度分别为  $344.59$ 、 $130.89$ 、 $157.41$ 、 $34.32$ 、 $22.68 \mu\text{m}$  和  $305.30$ 、 $117.10$ 、 $149.92$ 、 $32.84$ 、 $24.68 \mu\text{m}$ 。调制后烟叶钾、糖含量随垄高和施钾次数增加渐升,烟碱、蛋白质、氯含量随垄高和施钾次数增加总体渐降,以 A1B3、A1B2、A2B3 处理化学成分较协调;调制后烟叶外观质量各项指标均以高、中垄和 2、3 次施钾组合得分较高。垄高与分次施钾及其互作对雪茄烟叶光合特性、组织结构及调制后化学成分、外观质量等指标的影响基本均达到显著或极显著水平。通过裂区试验对雪茄烟叶光合特性、组织细胞发育状况及调制后烟叶化学成分、外观质量综合分析可知,四川优质雪茄烟适宜的栽培模式为高、中垄(垄高分别为 35、30 cm)和分 3 次施钾组合模式,该模式下烟叶生长发育良好,品质较优。

**关键词:**雪茄烟叶;垄高;分次施钾;光合特性;叶片组织结构;品质

**中图分类号:**S572.04;S572.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)12-0080-09

我国雪茄烟的主要种植方式为起垄栽培,垄高会显著影响垄体内的水、气、热,并影响肥料在垄体内的分布,而垄体变化会显著影响根际土壤中的空气与大气的交换<sup>[1-2]</sup>。四川雪茄烟区在夏秋季节多

雨易形成雨涝,适宜的垄高可以防止烟田土壤大量养分流失和根系缺氧,提高根系吸收水分和养分的能力<sup>[3-4]</sup>。钾离子( $K^+$ )作为烟株中最丰富的阳离子,可以维持细胞膨压、促进 60 种以上的酶充分活化以及提高烟叶抗病性、燃烧性和品质<sup>[1,5]</sup>。大量研究指出,合理设置施钾模式能够显著影响植物的光合特性,从而影响植株生长发育状况及最终品质<sup>[6-8]</sup>。

雪茄烟叶组织由各组织细胞组成,细胞结构与光合特性密切相关<sup>[9]</sup>,且可直接反映叶片发育状况、疏松程度和成熟特征,细胞发育状况和细胞排列间隙能够显著影响烟叶的工业可用性及品质,因此合理的组织结构对优质烟叶生产至关重要<sup>[10-13]</sup>。

收稿日期:2023-07-18

基金项目:中国烟草总公司重大科技项目[编号:110202201036(XJ-07)];中国烟草总公司四川省公司科技项目(编号:SCYC202127、SCYC202324)。

作者简介:阳苇丽(1986—),女,四川广安人,硕士,农艺师,主要从事烟叶技术与推广工作,E-mail:weiliyang2012@163.com;吴永兵(2000—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要从事雪茄烟栽培生理生化研究,E-mail:wyb011822@163.com。

通信作者:赵铭钦,教授,博士生导师,主要从事烟草化学品质与雪茄烟开发应用研究。E-mail:zhaomingqin@126.com。

优质雪茄烟叶要求组织结构细致、支脉细而不突、燃烧性和成熟度好<sup>[14-15]</sup>,国产雪茄烟叶存在着组织粗糙、支脉粗大等问题,极大地限制了国产雪茄产业的健康、可持续发展<sup>[16-17]</sup>,对于如何提高国产雪茄烟叶品质亟待研究。

前人已研究了土壤类型<sup>[18]</sup>、施氮量<sup>[19]</sup>、基因型<sup>[20]</sup>、肥料类型<sup>[12,16]</sup>、种植密度<sup>[13,21]</sup>、光照<sup>[17,22]</sup>等因素对烟叶生长发育的影响,但尚无垄高与分次施钾影响雪茄烟叶发育的研究报道。起垄与施肥是雪茄烟生产中最关键的栽培技术,探求适宜的垄高与施钾模式组合,以改善雪茄烟生长条件,从而提高烟叶最终品质,在国产雪茄烟生产实践中具有重要意义。本研究通过大田试验,在旺长期和成熟期,系统分析垄高与分次施钾互作对雪茄烟叶光合特性、组织细胞发育及调制后品质的影响规律,旨在为国产优质雪茄烟原料生产提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 4—9 月在四川省达州市峰城镇雪茄烟叶种植示范基地(107°97'E,31°53'N)进行,试验点属亚热带湿润季风气候,位于大巴山南麓,雨热资源丰富,雨热同期,全年平均气温 15~23℃

之间,平均降水量在 1 000~1 300 mm 之间,无霜期 300 d 左右,总日照时数 612.07 h 左右。试验田属沙壤土,pH 值 5.33~5.91,有机质含量 21.68 g/kg,全氮含量 1.23 g/kg,碱解氮含量 124.22 mg/kg,速效磷含量 35.00 mg/kg,速效钾含量 110.01 mg/kg。

供试品种为川雪 1 号,由达州市烟草公司提供。采用漂浮育苗方式培育烟苗,并于 4 月 26 日进行并窖式移栽,植烟密度为行距 120 cm、株距 40 cm,移栽后 55 d 打顶,根据当地优质雪茄烟叶生产技术规范统一管理。

1.2 试验设计

试验采用垄高和分次施钾 2 因素 3 水平裂区设计,主区为垄高,分别为 A1(高垄 35 cm)、A2(中垄 30 cm)、A3(低垄 25 cm);副区为分次施钾,分别为 B1(分 1 次施钾)、B2(分 2 次施钾)、B3(分 3 次施钾)。每个处理重复 3 次,共 9 个主区,27 个副区,每副区面积约为 70 m<sup>2</sup>。施纯氮 210 kg/hm<sup>2</sup>,施肥总比例为 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=1:1:2。所用肥料为烟草专用复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 12%、12%、25%)、过磷酸钙(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 0、12%、0)、有机油枯(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 5.3%、2.7%、1.2%)、硝酸钾(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 13.5%、0、44.5%),硝酸钾作追肥。具体处理方式如表 1 所示。

表 1 垄高与分次施钾互作处理具体描述

垄高	分次施钾	处理方式
A1	B1	高垄 35 cm、钾肥全部基施
	B2	高垄 35 cm、钾肥基施 80%+栽后 30 d 追施 20%
	B3	高垄 35 cm、钾肥基施 60%+栽后 30 d 追施 20%+栽后 45 d 追施 20%
A2	B1	中垄 30 cm、钾肥全部基施
	B2(CK)	中垄 30 cm、钾肥基施 80%+栽后 30 d 追施 20%
	B3	中垄 30 cm、钾肥基施 60%+栽后 30 d 追施 20%+栽后 45 d 追施 20%
A3	B1	低垄 25 cm、钾肥全部基施
	B2	低垄 25 cm、钾肥基施 80%+栽后 30 d 追施 20%
	B3	低垄 25 cm、钾肥基施 60%+栽后 30 d 追施 20%+栽后 45 d 追施 20%

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合参数测定 于烟株旺长期(移栽后 50 d)、成熟期(移栽后 70 d),每处理选取 5 张生长一致且受光方向相同的中部叶(自上而下,第 10~12 张),在 09:30—10:30 采用 GFS-3000 便携型光合仪(德国 WALZ 公司,自身携带稳定光源)测定其光合有效辐射(PAR)、净光合速率(P<sub>n</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(C<sub>i</sub>)及蒸腾速率(T<sub>r</sub>),取平均值。

1.3.2 质体色素含量测定 采用丙酮浸提比色法<sup>[23]</sup>,于旺长期、成熟期测定烟叶叶绿素、类胡萝卜素含量。

1.3.3 叶片组织结构观察测定 于烟株旺长期、成熟期进行取样,每处理选取 5 张具有代表性的中部叶,沿着叶片中部至尖部中央段两侧距主脉 2~3 cm 处进行打孔,主脉两侧各打 1 孔。取样时间为 09:30—10:30,取样后迅速将组织放入含有 50%乙醇的 FAA 固定液中固定并保存。采用石蜡切片法

制片,番红固绿对染,使用 Eclipse Ci-L 正置白光拍照显微镜(Nikon Japan)对组织目的区域进行倍数成像。成像完成后使用 Image-Pro Plus 6.0 软件(Media Cybernetics U.S.A)分析测量每张切片的叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、上下表皮厚度,计算栅海比(栅栏组织厚度/海绵组织厚度)。

1.3.4 调制后化学成分的测定 使用 AutoAnalyzer3 流动分析仪(德国 SEAL 公司)测定烟叶总糖、还原糖、烟碱、总氮、蛋白质、钾、氯等的含量<sup>[23]</sup>。

1.3.5 调制后外观质量的评定 由国家烟草栽培生理生化基地组织专家对烟叶进行成熟度、身份、结构、油分、色度、长宽、颜色均匀度、支脉粗细、支脉夹角、支脉平伏度、青杂、残伤等 12 项指标进行评分,评分标准参照王荣浩等的方法<sup>[24]</sup>。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 对数据进行统计和表格制作,Origin 2021 进行绘图,SPSS 26.0 进行显著性检验及方差分析。

2 结果与分析

2.1 垄高与分次施钾对雪茄烟叶光合特性的影响

2.1.1 对光合参数的影响 由表 2 可知,在旺长期,高、中垄处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  均随施钾次数增加渐降, $C_i$  随施钾次数增加渐升,低垄处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  随施钾次数增加渐升;1、2 次施钾处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$  均以中垄处理最高,3 次施钾处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$  均随垄高增加渐降,2、3 次施钾处理烟叶  $T_r$  以中垄处理显著最高,2 次施钾处理  $C_i$  随垄高增加渐降。成熟期时同一垄高处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  均以 3 次施钾处理最高, $C_i$  以 3 次施钾处理最低;同一施钾处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$  随垄高增加渐升, $G_s$ 、 $T_r$  均以高垄处理最高,总体以 A1B3 处理烟叶  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  最高,较 CK 分别显著提高 10.34%、11.58%、12.77%、31.34%。说明高垄下分 2、3 次施钾能改善后期烟叶光合特性,为烟叶细胞发育供应能量基础。

表 2 雪茄烟叶旺长期和成熟期光合作用参数

生育期	处理	$PAR$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$P_n$ [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$G_s$ [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	$C_i$ ( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ )	$T_r$ [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
旺长期	A1B1	1 166.72 ± 38.96bc	18.30 ± 0.34ab	179.94 ± 9.35cd	275.76 ± 7.77d	5.99 ± 0.27a
	A1B2	1 113.36 ± 33.98cd	17.64 ± 0.32bc	164.11 ± 7.07de	292.15 ± 9.97cd	4.23 ± 0.18ef
	A1B3	1 036.56 ± 20.87e	17.24 ± 0.28c	157.70 ± 7.46e	308.76 ± 13.99bc	3.66 ± 0.21g
	A2B1	1 320.32 ± 25.57a	18.79 ± 0.38a	219.64 ± 9.46a	295.55 ± 18.46bed	5.51 ± 0.22b
	A2B2	1 230.81 ± 21.89b	18.32 ± 0.33ab	203.03 ± 9.74ab	303.14 ± 14.55bc	5.47 ± 0.23b
	A2B3	1 090.56 ± 19.43de	17.55 ± 0.43bc	169.54 ± 7.69de	307.45 ± 12.79bc	5.07 ± 0.16c
	A3B1	1 040.08 ± 15.86e	17.31 ± 0.33c	178.11 ± 10.48cd	284.82 ± 12.46cd	4.07 ± 0.17f
	A3B2	1 164.48 ± 33.05bc	17.60 ± 0.37bc	196.70 ± 9.89bc	337.14 ± 9.44a	4.43 ± 0.16de
	A3B3	1 203.04 ± 19.63b	18.01 ± 0.47abc	215.87 ± 7.41a	321.09 ± 15.77ab	4.60 ± 0.17d
成熟期	A1B1	1 447.23 ± 15.77de	24.50 ± 0.51c	176.68 ± 4.79ab	303.69 ± 2.01a	2.91 ± 0.17de
	A1B2	1 507.18 ± 13.46c	25.29 ± 0.46b	181.77 ± 4.58a	300.47 ± 3.78ab	3.54 ± 0.16b
	A1B3	1 631.06 ± 29.56a	27.07 ± 0.67a	184.08 ± 5.69a	292.68 ± 1.98c	3.73 ± 0.11a
	A2B1	1 431.41 ± 20.06ef	23.93 ± 0.62d	160.04 ± 4.01de	297.32 ± 2.03b	2.79 ± 0.18e
	A2B2	1 478.23 ± 16.43c	24.26 ± 0.45cd	163.24 ± 3.89cde	297.62 ± 1.89b	2.84 ± 0.15e
	A2B3	1 547.27 ± 28.77b	25.43 ± 0.56b	181.69 ± 4.45a	294.14 ± 2.69bc	3.15 ± 0.11c
	A3B1	1 398.35 ± 17.98fg	22.88 ± 0.41e	157.21 ± 4.13e	296.21 ± 2.22b	2.87 ± 0.16de
	A3B2	1 385.34 ± 14.65g	22.16 ± 0.33f	171.45 ± 3.12bc	298.16 ± 1.98b	2.95 ± 0.16de
	A3B3	1 411.82 ± 20.04efg	22.93 ± 0.39e	168.24 ± 4.87bcd	290.46 ± 2.03c	3.04 ± 0.13d

注:不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。表 3、表 4 同。

2.1.2 对质体色素含量的影响 由图 1 可知,从旺长期到成熟期烟叶叶绿素和类胡萝卜素含量均大幅降低,有利于烟叶成熟落黄。旺长期高、中垄处理烟叶叶绿素含量随施钾次数增加渐降,低垄下随

施钾次数增加渐升;成熟期同一垄高处理烟叶叶绿素含量随施钾次数增加渐升,同一施钾处理烟叶叶绿素含量以高垄最高,其中 A1B3、A1B2 处理的叶绿素含量较高,较 CK 分别显著提高 25.17%、14.42% ,

说明高垄下分 2、3 次施钾能防止烟叶叶绿素降解过快而导致烟叶光能吸收转化不足。旺长期和成熟期烟叶类胡萝卜素含量变化规律及处理间差异与

叶绿素一致,成熟期时以 A1B3 处理烟叶类胡萝卜素含量最高,较 CK 显著提高 18.11%。

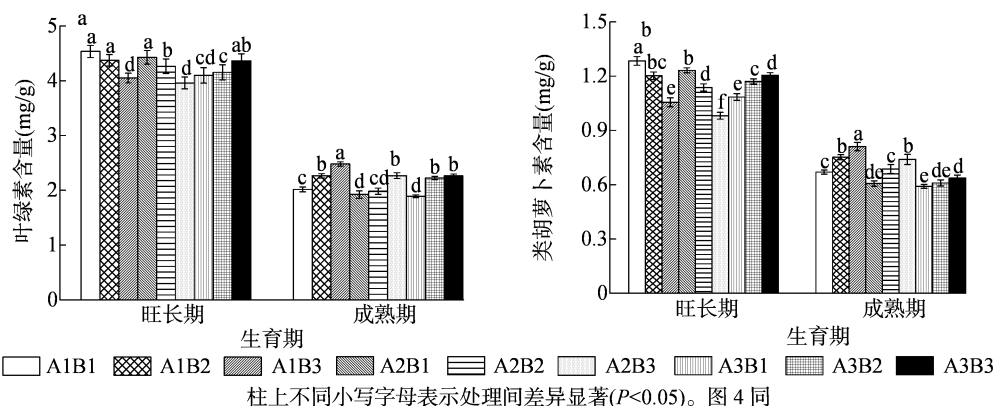


图1 雪茄烟叶旺长期和成熟期质体色素含量

## 2.2 垄高与分次施钾对雪茄烟叶组织结构的影响

由图2、图3可知,旺长期叶片各组织细胞分化明显,栅栏组织紧靠在上表皮下方,呈长圆柱状栅形排列,纵向伸长较明显,以 A1B1、A1B3、A2B3 处理排列较疏松;海绵组织位于栅栏组织下方,呈不规则排列且细胞间隙较大;上下表皮细胞未完全发

育成形,厚度较小。成熟期叶片组织细胞较旺长期发达,栅栏组织较旺长期纵向伸长更为明显且排列较规则;海绵组织细胞呈海绵状贯通连接,上下表皮组织细胞厚度较旺长期明显增加,以 A1B2、A1B3、A3B3 处理排列较疏松。

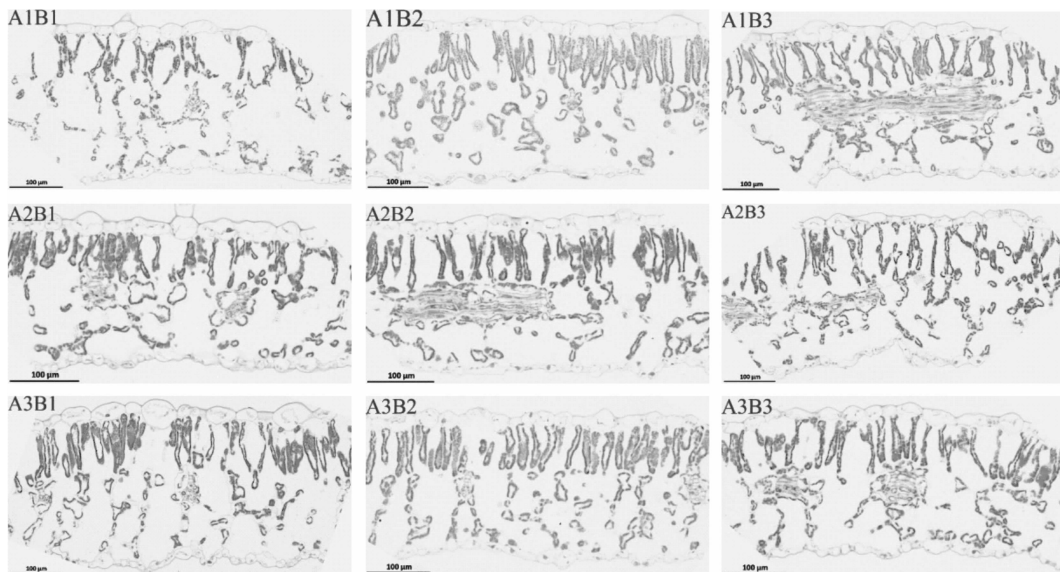


图2 雪茄叶片旺长期组织结构解剖图

由图4可知,旺长期,高、中垄下叶片厚度、栅栏和海绵组织厚度、栅海比及上下表皮厚度均以1次施钾处理最高,2、3次施钾处理较低;低垄下叶片厚度、栅栏和海绵组织厚度随施钾次数增加渐升;栅海比、上下表皮厚度以2次施钾处理最低,1、3次施钾处理较高;在垄高与分次施钾交互作用下,以A2B1、A3B3处理叶片组织细胞发育较好。成熟期,同一垄高下叶片厚度、栅栏和海绵组织厚度均以2、

3次处理施钾较高,栅海比以3次施钾处理最高,且叶片厚度、栅栏和海绵组织厚度、栅海比整体以高、中垄水平较高;上、下表皮厚度以A1B1、A1B3、A2B3、A3B1处理较高;在垄高与分次施钾交互作用下,整体以A1B3和A2B3处理烟叶组织较疏松且发育较好,A1B3和A2B3处理叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、上表皮厚度、下表皮厚度分别为344.59、130.89、157.41、34.32、22.68  $\mu\text{m}$ 和305.30、

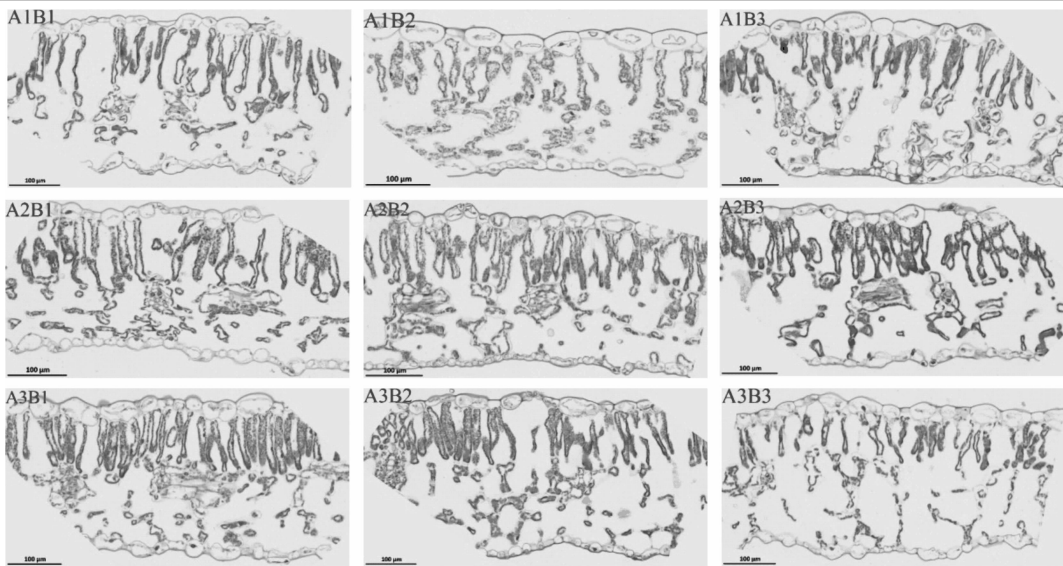


图3 雪茄烟叶片成熟期组织结构解剖图

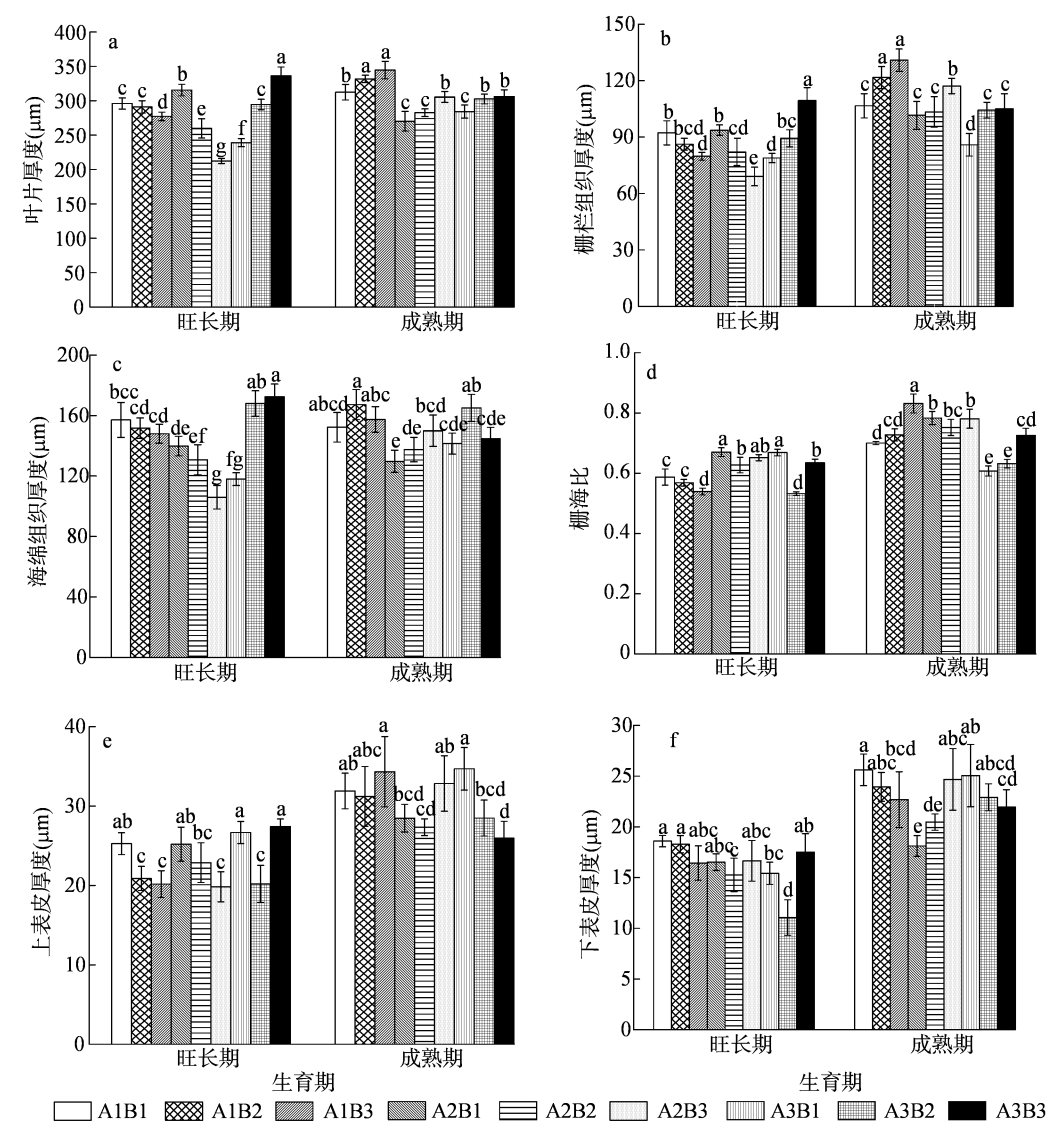


图4 雪茄烟叶旺长期和成熟期叶片组织结构

117.10、149.92、32.84、24.68  $\mu\text{m}$ 。

2.3 垄高与分次施钾对调制后雪茄烟叶品质的影响

2.3.1 对调制后烟叶化学成分的影响 由表 3 可知,同一垄高处理调制后烟叶的总糖、还原糖含量随施钾次数增加渐升,且同一施钾处理下随垄高增加渐升,说明高垄和分 2、3 次施钾可以适当提高调制后烟叶糖含量,为烟叶提供良好的香吃味。同一

施钾模式下,总氮含量整体以高垄最高、低垄较低,蛋白质含量均以低垄最高,且除中垄外总氮含量在同一垄高下随着施钾次数增加渐降,说明低垄或 1 次施钾不利于调制过程中烟叶含氮化合物的分解转化,会降低烟叶的燃烧性。钾含量随着垄高和施钾次数的增加渐升,氯含量则相反。以 A1B3、A1B2、A2B3 处理氮碱比较低、钾氯比较高,化学成分较协调。

表 3 各处理调制后雪茄烟叶化学成分

处理	总糖含量 (%)	还原糖含量 (%)	烟碱含量 (%)	总氮含量 (%)	蛋白质含量 (%)	钾含量 (%)	氯含量 (%)	氮碱比	钾氯比
A1B1	1.07 ± 0.03bc	0.71 ± 0.05bc	1.38 ± 0.06ab	3.38 ± 0.09a	4.32 ± 0.09abc	3.38 ± 0.06b	0.46 ± 0.02ab	0.46 ± 0.02ab	7.35 ± 0.14bcd
A1B2	1.18 ± 0.03a	0.79 ± 0.05ab	1.23 ± 0.06c	3.36 ± 0.08a	4.27 ± 0.12bc	3.52 ± 0.07a	0.44 ± 0.02ab	0.44 ± 0.02ab	8.02 ± 0.28b
A1B3	1.19 ± 0.02a	0.84 ± 0.03a	1.21 ± 0.06c	3.24 ± 0.09ab	3.95 ± 0.09d	3.55 ± 0.05a	0.39 ± 0.02b	0.39 ± 0.02b	9.11 ± 0.26a
A2B1	0.99 ± 0.04cd	0.69 ± 0.04c	1.46 ± 0.07a	2.98 ± 0.09c	4.41 ± 0.10ab	3.16 ± 0.05cd	0.47 ± 0.04ab	0.47 ± 0.04ab	6.77 ± 0.49cd
A2B2	1.08 ± 0.04b	0.71 ± 0.04bc	1.32 ± 0.07bc	3.23 ± 0.10ab	4.26 ± 0.18bc	3.29 ± 0.04bc	0.46 ± 0.03b	0.46 ± 0.03b	7.18 ± 0.42bcd
A2B3	1.18 ± 0.03a	0.79 ± 0.04ab	1.23 ± 0.04c	3.09 ± 0.07bc	3.98 ± 0.05d	3.42 ± 0.03ab	0.44 ± 0.03b	0.44 ± 0.03b	7.81 ± 0.51bc
A3B1	0.98 ± 0.05d	0.64 ± 0.06c	1.50 ± 0.05a	3.02 ± 0.06c	4.56 ± 0.10a	3.08 ± 0.04d	0.50 ± 0.06a	0.50 ± 0.06a	6.23 ± 0.64d
A3B2	1.01 ± 0.05bcd	0.65 ± 0.07c	1.47 ± 0.06a	2.94 ± 0.12c	4.45 ± 0.12ab	3.17 ± 0.11cd	0.48 ± 0.06ab	0.48 ± 0.06ab	6.67 ± 0.58d
A3B3	1.06 ± 0.04bcd	0.69 ± 0.06c	1.43 ± 0.04ab	2.93 ± 0.09c	4.10 ± 0.09cd	3.20 ± 0.08cd	0.46 ± 0.06b	0.46 ± 0.06b	7.04 ± 0.71bcd

2.3.2 对调制后烟叶外观质量的影响 由表 4 可知,同一垄高烟叶成熟度、结构、油分、色度、长宽、青杂以及残伤评分以 3 次施钾处理最高,2 次施钾处理次之,身份、颜色均匀度以及支脉粗细评分均以 2 次施钾处理最高;烟叶各外观质量整体均以低垄较低,高垄与中垄差异较小。说明低垄或 1 次施钾不利于雪茄烟叶良好外观品质的形成,高、中垄和 2、3 次施钾有利于提高调制后雪茄烟叶外观质量,以 A1B3、A1B2、A2B3 处理外观质量最优。

2.4 垄高与分次施钾互作效应

由表 5 可知,垄高对旺长期和成熟期  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、类胡萝卜素含量、叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比、上下表皮厚度的影响均达到显著或极显著水平,对旺长期  $C_i$  具有显著影响,对成熟期叶绿素含量影响极显著。分次施钾对旺长期  $PAR$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 、类胡萝卜素含量、海绵组织厚度、栅海比、上下表皮厚度影响均达到极显著水平,对成熟期  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、叶绿素和类胡萝卜素含量、叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比的影响均达到极显著。不同时期叶片组织结构还受 2 因素交互作用影响,垄高与分次施钾互作对旺长期  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、类胡萝卜素含量、叶片厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅海比、上下表皮厚度影响

均达到显著或极显著水平,对成熟期  $PAR$ 、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、叶绿素和类胡萝卜素含量、海绵组织厚度、栅海比、上下表皮厚度的影响均达到显著或极显著水平。

由表 6 可知,垄高对调制后烟叶总糖、还原糖、烟碱、总氮、蛋白质、钾含量以及氮碱比、钾氯比影响均达到显著或极显著水平,分次施钾对总糖、还原糖、总氮、蛋白质、钾含量以及氮碱比、钾氯比均具有极显著影响,垄高与分次施钾互作对氮碱比影响也达到了显著水平。

由表 7 可知,垄高对调制后烟叶成熟度、身份、结构、油分、色度、长宽、颜色均匀度、支脉夹角、支脉平伏度、青杂及残伤影响均达到显著或极显著水平,分次施钾对成熟度、身份、结构、油分、色度、长宽、颜色均匀度、支脉粗细、支脉夹角、支脉平伏度及青杂均具有显著或极显著影响,垄高与分次施钾互作对结构、色度、颜色均匀度、支脉粗细、支脉夹角及支脉平伏度的影响也达到了显著或极显著水平。说明垄高与分次施钾及其交互作用能够显著影响雪茄烟叶生长发育及调制后品质。

3 讨论与结论

垄高可以通过调节土壤环境影响植物生长发育<sup>[1,25-26]</sup>,分次施钾可以促进植株生长发育及钾素

表 4 各处理调制后雪茄烟叶外观质量

指标	得分(分)											
	成熟度	身份	结构	油分	色度	长宽	颜色均匀度	支脉粗细	支脉夹角	支脉平伏度	青杂	残伤
A1B1	8.0±0.1c	8.6±0.2b	7.9±0.2c	8.4±0.2b	8.2±0.2a	8.2±0.2c	8.2±0.2b	7.9±0.2b	8.7±0.2b	7.4±0.2c	8.2±0.1b	9.1±0.2a
A1B2	8.4±0.2ab	9.0±0.2a	8.4±0.2ab	8.7±0.2a	8.2±0.2a	8.5±0.2b	8.8±0.3a	8.4±0.2a	9.0±0.1a	7.9±0.2b	8.6±0.3a	9.1±0.2a
A1B3	8.7±0.2a	8.5±0.2b	8.6±0.2a	8.7±0.2a	8.4±0.3a	9.1±0.2a	8.6±0.2a	8.1±0.2ab	9.1±0.2a	8.2±0.1a	8.6±0.2a	9.2±0.3a
A2B1	8.0±0.1c	8.4±0.1b	7.8±0.2c	8.3±0.2b	7.7±0.2b	8.5±0.2b	8.4±0.1b	8.0±0.2b	8.6±0.2b	7.6±0.2c	8.1±0.2b	9.0±0.2a
A2B2	8.2±0.1b	8.7±0.2ab	8.5±0.2a	8.6±0.2ab	7.8±0.2b	8.7±0.2b	8.8±0.3a	8.2±0.1a	9.1±0.3a	8.3±0.2a	8.5±0.2a	9.1±0.2a
A2B3	8.6±0.2a	8.5±0.2b	8.6±0.3a	8.8±0.3a	8.4±0.3a	9.1±0.2a	8.6±0.2a	8.0±0.1b	9.1±0.2a	8.2±0.1a	8.5±0.2a	9.2±0.2a
A3B1	7.7±0.3c	8.1±0.2c	7.7±0.3c	7.6±0.3c	7.6±0.3b	7.8±0.1d	7.8±0.2c	7.8±0.2b	7.6±0.3c	7.2±0.2d	8.0±0.2b	8.8±0.3a
A3B2	7.9±0.2c	8.5±0.2b	7.9±0.1c	7.8±0.2c	8.1±0.2a	8.1±0.2c	8.5±0.2ab	8.3±0.2a	7.5±0.3c	7.9±0.2b	8.4±0.1a	8.8±0.3a
A3B3	8.2±0.1b	8.2±0.21	8.2±0.2b	7.9±0.2c	8.4±0.3a	8.4±0.2bc	8.5±0.2ab	8.3±0.2a	7.4±0.3c	8.0±0.1b	8.5±0.2a	9.0±0.2a

表 5 雪茄烟叶光合特性和组织结构方差分析

指标	变异来源	P 值	
		旺长期	成熟期
光合有效辐射	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	0.003 **	<0.001 **
净光合速率	垄高×分次施钾	<0.001 **	<0.001 **
	垄高	0.027 *	<0.001 **
	分次施钾	0.063	<0.001 **
气孔导度	垄高×分次施钾	0.011 *	<0.001 **
	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	0.087	<0.001 **
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度	垄高×分次施钾	<0.001 **	0.009 **
	垄高	0.010 *	0.467
	分次施钾	0.001 **	0.093
蒸腾速率	垄高×分次施钾	0.062	0.867
	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	<0.001 **	<0.001 **
叶绿素含量	垄高×分次施钾	<0.001 **	<0.001 **
	垄高	0.846	<0.001 **
	分次施钾	0.576	<0.001 **
类胡萝卜素含量	垄高×分次施钾	0.605	0.003 **
	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	<0.001 **	<0.001 **
叶片厚度	垄高×分次施钾	<0.001 **	0.015 *
	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	0.075	<0.001 **
栅栏组织厚度 PT	垄高×分次施钾	<0.001 **	0.078
	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	0.420	<0.001 **
海绵组织厚度 ST	垄高×分次施钾	<0.001 **	0.078
	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	0.003 **	<0.001 **
栅海比 PT/ST	垄高×分次施钾	<0.001 **	0.011 *
	垄高	<0.001 **	<0.001 **
	分次施钾	<0.001 **	<0.001 **
上表皮厚度	垄高×分次施钾	<0.001 **	<0.001 **
	垄高	0.002 **	0.026 *
	分次施钾	<0.001 **	0.067
下表皮厚度	垄高×分次施钾	<0.001 **	0.001 **
	垄高	<0.001 **	0.003 **
	分次施钾	0.002 **	0.710
	垄高×分次施钾	<0.001 **	<0.001 **

注：\*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平上显著。表 6、表 7 同。

利用率<sup>[7,27]</sup>,二者均可显著影响叶片的光合生理、水分生理<sup>[28-29]</sup>,合理设置垄高与施钾模式是协调植株生长发育进而提高作物产质量的重要手段<sup>[1,25,30-31]</sup>。

表 6 垄高与分次施钾互作对烟叶化学成分影响的 *F* 测验

项目	<i>F</i> 值									
	<i>df</i>	总糖含量	还原糖含量	烟碱含量	总氮含量	蛋白质含量	钾含量	氯含量	氮碱比	钾氯比
垄高	2	16.779 **	11.658 **	25.188 **	5.076 *	15.780 **	42.257 **	2.294	63.801 **	15.047 **
分次施钾	2	16.956 **	7.560 **	1.521	23.932 **	15.926 **	13.078 **	2.05	20.002 **	9.542 **
垄高 × 分次施钾	4	1.515	0.692	2.215	0.163	1.495	0.76	0.156	4.257 *	0.567

表 7 垄高与分次施钾互作对烟叶外观质量影响的 *F* 测验

项目	<i>F</i> 值												
	<i>df</i>	成熟度	身份	结构	油分	色度	长宽	颜色均匀度	支脉粗细	支脉夹角	支脉平伏度	青杂	残伤
垄高	2	23.167 **	18.429 **	40.333 **	150.250 **	8.375 **	46.429 **	28.000 **	1.000	184.900 **	25.333 **	4.750 *	8.143 **
分次施钾	2	40.667 **	15.857 **	105.333 **	24.250 **	27.875 **	48.143 **	79.000 **	27.250 **	4.900 *	142.333 **	39.250 **	3.000
垄高 × 分次施钾	4	0.667	0.857	4.833 **	1.000	4.062 *	1.214	5.000 **	4.375 *	3.700 *	3.333 *	0.250	0.214

烟叶作为烟株制造有机物的重要器官,其光合特性直接影响着雪茄烟叶的最终产质量。本研究表明,旺长期高、中垄处理叶片净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及光合色素含量随着施钾次数增加渐降,这可能是因为分次施钾提高了烟株对 K<sup>+</sup> 的吸收利用,而与同样属于阳离子的 Mg<sup>2+</sup> 产生了拮抗竞争效应,阻碍了烟株对烟叶细胞合成色素所需 Mg<sup>2+</sup> 等阳离子的吸收,导致色素含量低,进而抑制烟株体内类囊体膜上的电子传递和光合磷酸化<sup>[26]</sup>,导致净光合速率的降低;低垄叶片净光合速率及光合色素含量随施钾次数增加渐升,这可能是因为低垄土壤根际温度较低,根系代谢活动较弱,导致钾素吸收严重不足,烟株针对低钾胁迫做出适应性反应<sup>[32-33]</sup>。于祥全等研究发现,高垄独特的弧面结构能使土壤接触阳光的角度变大,提升土壤温度,并且能够改善土壤结构,调节根际微生物菌群,从而促进烟株生长代谢,进而改善光合特性;低垄则会导致根系水分过饱和而造成缺氧,降低烟株代谢能力<sup>[34]</sup>。李合生等研究表明,分次施钾能够促进烟叶后期养分吸收,通过渗透调节有效缓解叶片水势的降低,使细胞内部保持相对稳定的状态,同时提高细胞膨压,以促进气孔张开、孔径增大<sup>[26,35-36]</sup>,这与本研究中成熟期叶片净光合速率、气孔导度随着垄高增加渐升且同一垄高时 3 次施钾处理最高的研究结果一致。

烟叶作为一种可塑性器官,其组织细胞发育状况与光合特性关联密切且直接决定烟叶最终品质<sup>[22,37]</sup>。本研究发现,旺长期高、中垄烟叶叶片各组织厚度随施钾次数增加渐降,而低垄下叶片各组

织厚度以分 3 次施钾处理最大,结合烟叶光合特性可知,这是因为高、中垄下分 2、3 次施钾,烟叶净光合速率较低,导致烟叶吸收光能转化成化学能的效率下降,细胞发育所需能量供应不足,从而阻碍细胞发育,而低垄下分 3 次施钾处理的净光合速率及光合色素含量较高,为细胞发育提供了充足的能量<sup>[1,5,26]</sup>。成熟期较旺长期叶片组织厚度总体有不同程度的增加,组织细胞更加发达,这与刘国敏等的研究结果<sup>[13,21]</sup>一致;叶片厚度、栅栏组织厚度总体随垄高和施钾次数增加渐升,同一垄高下栅海比均以分 3 次施钾最高,这是因为高垄能够提高土壤温度和通气性,提高根系代谢强度,进而促进烟株对钾颗粒及 K<sup>+</sup> 等矿质养分的吸收<sup>[26]</sup>,这有利于烟株合成有机物,为细胞发育提供充足养分,而分次施钾能够有效弥补钾素的前期淋溶流失,促进烟株对 K<sup>+</sup> 等矿质养分的吸收,以供成熟期叶片细胞发育<sup>[38]</sup>。进一步研究发现,叶片栅栏组织内有大量的叶绿体,是光合作用的主要部位,栅栏组织厚度及栅海比降低将影响叶片进行光合作用,两者具有显著的相关性<sup>[1,21-22]</sup>,这与本研究对雪茄烟叶片组织细胞发育与光合特性的处理间差异结果基本一致。

垄高、分次施钾及其互作对雪茄烟叶光合特性、组织结构及调制后品质影响显著。高、中垄(垄高分别为 35 cm、30 cm)和分 3 次施钾组合栽培模式能够显著改善烟叶中后期光合特性,防止叶片早衰,促进叶片组织细胞发育,且叶片组织结构疏松,调制后烟叶化学成分协调、外观质量较优,对雪茄烟叶茄衣产出率及工业可用性的提高具有促进作用。本试验可为四川雪茄烟叶优质高产栽培提供



理论支撑。

#### 参考文献:

- [1] 刘国顺. 烟草栽培学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [2] 于会泳,高林,王毅,等. 烟草种植起垄高度与移栽深度的交互效应研究[J]. 中国烟草科学,2012,33(2):82-85.
- [3] 刘慧. 四川烟区主要生态因子与雪茄烟叶品质关系研究[D]. 郑州:河南农业大学,2022.
- [4] 周恩达,门永阁,周乐,等. 过量灌溉条件下起垄栽培对富士苹果生长和<sup>15</sup>N-尿素利用、分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(3):650-655.
- [5] 胡国松,郑伟,王震东,等. 烤烟营养原理[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [6] 李荣春,李佛琳,徐琼华. 钾对烤烟叶片解剖结构的效应及其品种差异[J]. 中国烟草科学,2001(2):41-43.
- [7] 柳洪鹏,史春余,柴沙沙,等. 不同时期施钾对甘薯光合产物运转动力的调控[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):171-180.
- [8] 张士荣,王军,林昌华,等. 钾肥运筹对砂泥土土壤烤烟生长、钾素吸收及香气品质改善的影响[J]. 华北农学报,2019,34(2):187-197.
- [9] Chen Y J, Ren K, He X, et al. Dynamic changes in physiological and biochemical properties of flue-cured tobacco of different leaf ages during flue-curing and their effects on yield and quality[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1):555.
- [10] 徐兴阳,廖孔凤,代瑾然,等. 不同鲜烟叶成熟度的组织结构和生理生化研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2017,39(2):313-323.
- [11] 黄勇,周冀衡,刘建利,等. 不同部位烟叶海绵与栅栏细胞中主要化学成分研究[J]. 中国农业科学,2007,40(10):2289-2295.
- [12] 李哲,陈爱国,金红成,等. 不同氮肥形态下烤烟叶片组织结构的差异及对焦油释放量的影响研究[J]. 中国烟草学报,2014,20(2):70-74.
- [13] 刘国敏,邵兰军,高卫锴,等. 种植密度和施氮量对烟叶组织结构发育及化学成分的影响[J]. 华北农学报,2016,31(4):206-213.
- [14] 许娜,许家来,朱先志,等. 饼肥与化肥配施对烤烟叶片组织结构及有机酸含量的影响[J]. 中国烟草科学,2016,37(1):20-25.
- [15] 任晓春,高华军,张本强,等. 不同雪茄烟品种生长发育对光强的响应差异[J]. 中国烟草科学,2022,43(3):96-102.
- [16] 李爱军,秦艳青,代惠娟,等. 国产雪茄烟叶科学发展刍议[J]. 中国烟草学报,2012,18(1):112-114.
- [17] 蔡斌,耿召良,高华军,等. 国产雪茄原料生产技术研究现状[J]. 中国烟草学报,2019,25(6):110-119.
- [18] 张国,时向东,季学军,等. 皖南砂壤土和水稻土烤烟叶片组织结构发育规律研究[J]. 中国烟草科学,2011,32(6):37-42.
- [19] 智磊,罗定棋,熊莹,等. 施氮量对烤烟叶片组织结构和细胞发育的影响[J]. 烟草科技,2012(7):81-85.
- [20] 张思琦,何佳,周方,等. 不同烤烟品种(系)叶片组织结构、腺毛及分泌物比较分析[J]. 中国农业科技导报,2019,21(1):132-140.
- [21] 刘继坤,徐立国,黄择祥,等. 密度和施氮量互作对烤烟叶片组织结构的影响[J]. 中国烟草科学,2018,39(1):24-31.
- [22] 吴晓颖,高华军,王晓琳,等. 光照强度对雪茄烟叶片组织结构及内源激素含量的影响[J]. 中国烟草科学,2021,42(2):37-42.
- [23] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [24] 王荣浩,施友志,李林林,等. 基于组合客观赋权法的进口茄衣质量评价[J]. 中国烟草学报,2022,28(2):138-148.
- [25] 张琛,韩婷,马洁,等. 起垄高度对黑果枸杞生长及生理特性的影响[J]. 中国农业科技导报,2020,22(9):153-161.
- [26] 李合生,王学奎. 现代植物生理学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2019.
- [27] 张玉芹,杨恒山,高聚林,等. 施钾方式对高产春玉米根系分布及其活力的影响[J]. 水土保持通报,2015,35(6):64-69.
- [28] Hu W S, Lu Z F, Gu H H, et al. Potassium availability influences the mesophyll structure to coordinate the conductance of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O during leaf expansion[J]. Plant, Cell & Environment, 2022, 45(10):2987-3000.
- [29] Lu Z F, Xie K L, Pan Y H, et al. Potassium mediates coordination of leaf photosynthesis and hydraulic conductance by modifications of leaf anatomy[J]. Plant, Cell & Environment, 2019, 42(7):2231-2244.
- [30] 张翔宇,胡鑫慧,谷淑波,等. 减氮条件下分期施钾对冬小麦籽粒产量和氮素利用效率的影响[J]. 作物学报,2023,49(2):447-458.
- [31] 胡鑫慧,谷淑波,朱俊科,等. 分期施钾对不同质地土壤麦田冬小麦干物质积累和产量的影响[J]. 作物学报,2021,47(11):2258-2267.
- [32] 何伟,杨中义,张发明,等. 低钾胁迫下不同烤烟品种根系生长和根毛形态的差异[J]. 中国烟草学报,2010,16(3):43-48.
- [33] 代晓燕,陈培钰,李子绅,等. 不同钾水平下外源铵对烟草幼苗根系生长及钾吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料,2023(9):120-127.
- [34] 于祥全,蔡宪杰,薛琳,等. 根层空间对烤烟品质和均质化的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(22):71-75.
- [35] 熊志豪,杨丞,张赓,等. 不同生育期干旱胁迫条件下施钾对水稻生理性状和产量的影响[J]. 土壤学报,2024,61(1):140-150.
- [36] 张红雪,吴凤英,陈宇琳,等. 烟秆生物炭对土壤不同形态钾含量及烟草光合特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2022,51(4):468-477.
- [37] 张玉琴,周蕾,王永,等. 温度对烟草叶片细胞壁物质含量及组成变化的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(01):39-48.
- [38] 杨双剑. 不同施钾水平和施钾方法对晒红烟生长及品质的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2005.