

引用格式:

胡庆辉, 付帅, 张仲文, 王卫民, 赵炯平, 菅攀锋, 江智敏, 周海宽, 李思军, 邓小华. 稳温降湿烘烤工艺下的烟叶物质变化特征及品质效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 19–27.

HU Q H, FU S, ZHANG Z W, WANG W M, ZHAO J P, JIAN P F, JIANG Z M, ZHOU H K, LI S J, DENG X H. Characteristics of substance change and quality outcomes in tobacco leaves under a stable-temperature and humidity-drop curing process[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(5): 19–27.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



稳温降湿烘烤工艺下的烟叶物质变化特征及品质效应

胡庆辉¹, 付帅¹, 张仲文¹, 王卫民¹, 赵炯平¹, 菅攀锋¹, 江智敏¹, 周海宽², 李思军³, 邓小华^{2*}

(1. 浙江中烟工业有限责任公司, 浙江 杭州 310008; 2. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 3. 湖南省烟草公司郴州市公司桂阳县分公司, 湖南 郴州 424400)

摘要:以湘烟7号中部叶为试验材料,设计稳温降湿烘烤工艺与四步式烘烤工艺2个处理,研究烘烤过程中的烤房内温湿度均匀度、烟叶物质动态变化对烤后烟叶的外观质量、物理性状、化学成分、评吸质量和烘烤经济效益的影响。结果表明:烤房内温度垂直差异小于水平差异,但湿度垂直差异大于水平差异;与四步式烘烤工艺相比,稳温降湿烘烤工艺可以提高烤房的温湿度均匀度,增加烟叶色度和油分,提高单叶质量和糖含量,减少烟叶淀粉和类胡萝卜素含量,正组烟叶比例提高3.27个百分点,杂色烟叶比例降低2.08个百分点,微带青烟叶比例降低1.18个百分点,上等烟率提高3.92个百分点,均价提高5.02%,外观质量总分和评吸总分分别提高5.31%、3.05%,烘烤能耗成本减少6.91%。因此,对稻作烟区中部烟叶选用稳温降湿烘烤工艺,能提升烟叶品质,节约成本,提高烘烤经济效益。

关键词:中部烟叶;烘烤工艺;温湿度;烟叶品质;经济效益

中图分类号: S572

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)05-0019-09

Characteristics of substance change and quality outcomes in tobacco leaves under a stable-temperature and humidity-drop curing process

HU Qinghui¹, FU Shuai¹, ZHANG Zhongwen¹, WANG Weimin¹, ZHAO Jiongpeng¹,

JIAN Panfeng¹, JIANG Zhimin¹, ZHOU Haikuan², LI Sijun³, DENG Xiaohua^{2*}

(1. China Tobacco Zhejiang Industrial Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310008, China; 2. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3. Guiyang County Branch of Chenzhou Tobacco Company in Hunan Province, Chenzhou, Hunan 424400, China)

Abstract: This study utilized middle-position leaves of the tobacco variety Xiangyan No.7 to compare two curing processes: the stable-temperature and humidity-drop curing process and the four-step curing process. The investigation assessed the uniformity of temperature and humidity within the curing barn, monitored the dynamic changes in leaf substances and evaluated their collective effects on the appearance quality, physical properties, chemical composition, and smoking quality of the cured tobacco leaves, as well as on the processing economic efficiency. The results showed that the vertical difference in temperature was smaller than the horizontal one, while the opposite was true for humidity. Compared with the four-step curing process, the stable-temperature and humidity-drop curing process enhanced the uniformity of temperature and humidity within the barn and increased leaf chroma, oil content, individual leaf mass, and sugar content, while reducing the starch and carotenoid content of the tobacco leaves. It increased the proportion of

收稿日期: 2024-12-19

修回日期: 2025-10-20

基金项目: 浙江中烟科技重点项目(ZJZY2023B001)

作者简介: 胡庆辉(1985—),男,山东鱼台人,硕士,工程师,主要从事烟草营养学研究, hqinghui@zjtobacco.com; *通信作者,邓小华,博士,教授,主要从事烟草科学与工程技术研究, yzdxh@163.com

normal-group tobacco leaves by 3.27 percentage points, reduced the proportion of variegated tobacco leaves by 2.08 percentage points, and decreased the proportion of slightly greenish tobacco leaves by 1.18 percentage points. In addition, it increased the proportion of high quality tobacco leaves by 3.92 percentage points, raised the average price by 5.02%, improved the total score for appearance quality and sensory quality by 5.31% and 3.05%, respectively, and reduced the curing energy cost by 6.91%. Therefore, adopting the stable-temperature and humidity-drop curing process is recommended for middle-position tobacco leaves in rice-cropping tobacco regions to achieve improved tobacco quality, reduced costs, and greater curing economic efficiency.

Keywords: middle tobacco leaves; curing process; temperature and humidity; tobacco quality; economic effects

烘烤工艺影响烤后烟叶品质、经济性状以及烟农收入,是烟草调制的关键^[1-2]。湖南烟稻复种区烤烟大田期降雨多、施肥水平高、留叶数少,导致鲜烟叶含水率高、叶片厚、结构紧密、色素类物质含量高。近年来,常以减少采烤次数达到减工降本的目的,但中部烟叶一次性采收叶片较多(5~6片),各叶位间成熟度不同,鲜烟叶素质差异较大,烤后烟叶青杂烟比例高,导致烘烤损失大^[2-4],迫切需要优化现有烘烤工艺,以适应当前采收方式下的鲜烟叶素质。针对不同地区、不同品种鲜烟叶素质的基本情况,前人进行了大量烘烤工艺的探索与研究。李昱霖等^[5]研究认为,采用同步预热低湿变黄烘烤工艺可以提高烟叶可用性,提高整体烘烤质量;李晓辉等^[6]研究认为,采用降湿升温定色烘烤工艺可以降低烤后青杂烟比例,增加总糖和还原糖含量,改善评吸质量;朱伟等^[7]研究认为,采用222烘烤工艺可以提高烟叶品质,降低烘烤成本;任汝周等^[8]研究认为,在干筋期采用中温中湿的烘烤方式有利于促进烟叶内含物质的转化,提高正组烟叶比例和均价;覃潇等^[9]研究认为,低温低湿烘烤工艺优于中温中湿烘烤工艺。虽然国内外有关烘烤工艺的研究较多,但有关稻作烟区6片中部烟叶一次性采收的烘烤工艺的研究较少,特别是该工艺下的烤房温湿度均匀度变化和烘烤过程中物质动态变化的特征尚少见报道。近年来,烘烤参数控制精度高、节能减排的热泵电烤房正在各烟区逐步推广,其烘烤工艺也有待研究。本研究中,针对湖南烟稻复种区鲜烟叶含水量高、叶片厚实、结构紧密、色素含量高的特性,研究不同烘烤工艺中烤房内温湿度分布状况和物质变化特征及其对烟叶品质的影响,旨在为湖南稻作烟区制定降本增效烘烤工艺提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验于2023年在郴州市桂阳县太山烘烤工场进行。以湘烟7号为试验品种。烟株打顶后保留有效叶片16片。待下部叶采收完毕后,选择留有12片叶的烟株,当中部叶达到适熟状态(叶面变黄20%~70%、主脉变白1/3~全白、支脉变白1/4~全白)^[4]后,再从下往上一次性采收6片叶作为试验材料。选用气流上升式热泵密集电烤房(XD-HP-15SS01,湖南鑫迪新能源科技有限公司生产),每炕装烟量约为4 000 kg。

1.2 试验设计

试验设稳温降湿烘烤工艺(T)和四步式烘烤工艺(CK)2个处理。T处理流程:装烤结束后,风机高速运行15~30 min后调整为低速;开机后以1 °C/h的速率升温,将干、湿球温度同步升至36 °C,稳温同步预热约4 h,至全烤烟叶膨胀发汗,循环方式以内循环为主;同步预热完成后,以1 °C/h的速率升温,使干球温度达38~39 °C,湿球温度达37~38 °C,稳温保湿至烟叶变黄7~8成,叶片变软,循环风机低速运转,其间间歇性排湿;再进行升温降湿处理,干球温度升至40~41 °C,湿球温度以0.5~1.0 °C/h的速率降至35~36 °C,稳温至烟叶变黄9成,叶片凋萎,叶脉发软,循环风机切换为高速运转;后续工序按四步式烘烤工艺的黄筋期、干片期、干筋期工艺进行烘烤。CK处理流程:黄片前期(50~66 h),干、湿球温度分别为39~40 °C、38~39 °C,叶片变黄8~9成;黄片后期,干、湿球温度分别为40 °C、34~37 °C,叶片发软并充分塌架;黄筋前期(55 h),干、湿球温度分别为43 °C、34~37 °C,叶片失水,主脉发软;黄筋后期,干、湿球温度分别为45 °C、34~37 °C,烟叶达到黄片黄筋状态;干片期(16 h),干、湿球温度分别为54~55 °C、38~39 °C,叶片达到全干状态;干筋期(24 h),干、湿球温度分别为65 °C、40~41 °C,主筋达到全干状态。具体烘烤工艺曲线见图1。

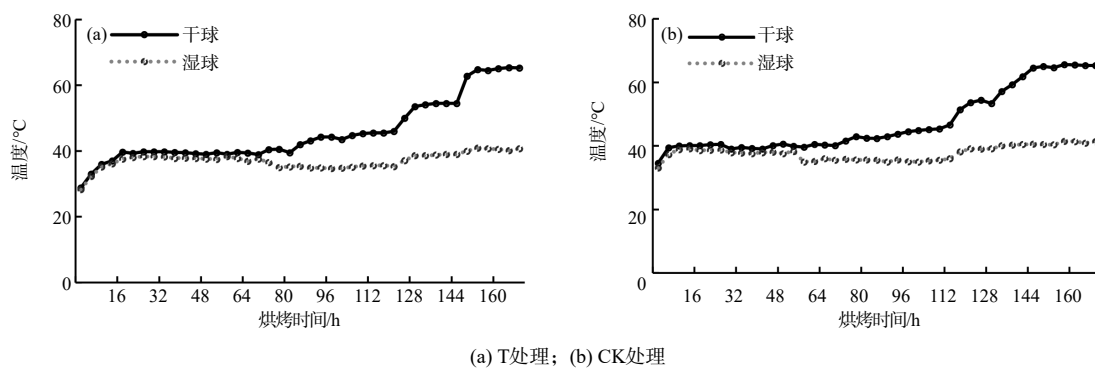


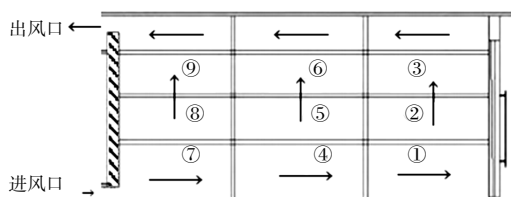
图1 中部叶烘烤工艺曲线

Fig.1 Curing profiles of the two treatments for middle-position tobacco leaves

1.3 测定项目及方法

1.3.1 烘烤过程中烤房温湿度的测定

在烤房中布置9个温湿度观测点,每个观测点安装1只温湿度探头(图2)。烘烤过程中共进行9次取样:点火前(0 h)进行第1次取样;36 °C预热完成后(11 h)进行第2次取样;36 °C升温至39~40 °C(16 h),进行第3次取样;39~40 °C稳温至烟叶7成黄,湿球开始降温时(80 h)进行第4次取样;湿球温度降至35 °C,稳温结束后升至36 °C时(101 h)进行第5次取样;黄片期结束(110 h)时进行第6次取样;黄筋期结束(125 h)时进行第7次取样;干片期结束(147 h)时进行第8次取样;干筋期结束(168 h)时进行第9次取样;分别标记为①~⑨,记录每个观测点的温度和湿度。



→表示烤房空气运动方向;①~⑨表示9支温湿度探头安放位置。

图2 温湿度探头位置分布

Fig.2 Layout of temperature and humidity probes

1.3.2 烘烤过程中物质测定

烘烤过程中共进行9次取样(时间同上),分别测定烟叶的水分含量、色素(叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素)含量等。采用分光光度法^[10]测定叶绿素含量和类胡萝卜素含量,采用连续流动分析法^[11]测定淀粉含量,采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[12]测定还原糖含量。

1.3.3 烤后烟叶质量评价指标的测定

1) 烟叶外观质量。对烤后烟叶的颜色、成熟度、叶片结构、身份、油分、色度等6个指标进行定性和定量评价(指标满分10分)^[13-14],分别赋予以上6项指标2.0、3.0、1.6、1.2、1.2、1.0的权重,计算外观质量总分。

2) 烟叶物理性状。烟叶水分平衡后选30片C3F等级的烟叶,按照邓小华等^[15]的方法测定烟叶单叶质量、含梗率、叶片厚度、平衡含水率、叶面积质量等5个指标。

3) 烟叶化学成分。采用SKALAR间隔流动分析仪测定C3F等级烟叶的氯、总糖、还原糖、烟碱、总氮、淀粉、绿源酸含量^[11];采用火焰光度法测定钾含量^[16];计算两糖比(还原糖含量与总糖含量之比)和糖碱比(总糖含量与烟碱含量之比)。

4) 烟叶评吸质量。选用各处理下的C3F等级烟叶,按照YC/T 530—2015^[17]中的方法将其制成单料烟支。对烟叶的香气特性(香气质20分、香气量18分、透发性6分、杂气8分)和烟气特性(细腻程度6分、柔和程度6分、圆润感8分)以及口感特性(刺激性10分、干燥感8分、余味10分)进行评价赋分,并统计评吸质量总分。

1.3.4 烘烤后经济效果的评价

1) 烟叶分组统计。烘烤后对中部烟叶进行分级,分别统计正组烟叶(中部柠檬黄、橘黄、红棕色组)、杂色烟叶和微带青烟叶的质量,计算其所占比例。

2) 经济性状的考查。统计C1F、C2F、C3F等上等烟的质量,计算其占总质量的比例,记为上等烟比例;按当地收购价计算各等级烟叶产值,并统计烟叶均价。

3) 烘烤能耗的统计。记录每个烤房烘烤烟叶的用电量,按0.58元/(kW·h)计算能耗成本。

2 结果与分析

2.1 烘烤过程中烤房关键时期的温湿度

2.1.1 不同烘烤工艺的烤房内温度变化比较

由表1可知,从垂直温度平均值看,T处理与CK烘烤工艺差异主要体现在第1至第4观测时间点,该时间段内,顶棚、中棚和底棚的温度均表现为T处理的不高于CK的,第4观测时间点后,两者温度差

异缩小,且呈现交错现象;从水平温度平均值看,T处理与CK烘烤工艺差异主要体现在第1至第5观测时间点,该时间段内,前部、中部、尾部的温度基本表现为T处理的不高于CK的。从不同烘烤工艺的温度极差来看,除个别观测时间点外,均是垂直温度极差小于水平温度极差,表明烤房内垂直温度差异小于水平温度差异;从不同烘烤工艺的垂直温度和水平温度极差的差值来看,T处理的极差与CK处理的极差的差值均小于等于0,表明T烘烤工艺的烤房内温度较为均匀。

表1 不同烘烤工艺的烤房温度

Table1 Barn air temperature under different curing processes												℃
比较方式	统计量	位置	处理	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次	第9次
垂直	均值	顶棚	T	29.43	36.73	39.06	40.71	44.47	45.57	51.69	57.63	65.76
			CK	31.87	39.63	40.53	40.93	44.13	45.97	51.50	57.33	66.03
		中棚	T	29.43	36.43	39.00	40.93	44.23	45.47	51.40	57.53	65.69
			CK	31.90	39.83	40.13	41.43	44.43	45.23	52.00	58.27	66.33
		底棚	T	29.63	36.77	39.40	40.83	44.53	45.77	51.80	57.73	66.13
			CK	32.10	40.03	40.53	41.10	44.13	45.57	51.60	57.93	66.53
	极差		T	0.20	0.34	0.40	0.22	0.30	0.30	0.40	0.20	0.44
			CK	0.23	0.40	0.40	0.50	0.30	0.74	0.50	0.94	0.50
	T与CK极差的差值			-0.03	-0.06	0.00	-0.28	0.00	-0.44	-0.10	-0.74	-0.06
	水平	前部	T	29.23	36.30	38.70	39.97	43.83	45.23	50.97	57.20	65.37
			CK	31.80	39.50	40.17	40.80	43.90	45.23	51.30	57.40	65.77
		中部	T	29.53	36.80	39.10	40.37	44.23	45.73	51.47	57.80	66.07
			CK	31.83	39.90	40.37	41.27	44.30	45.70	51.80	58.00	66.47
		尾部	T	29.63	36.73	39.20	40.57	44.43	45.83	51.67	57.90	66.23
			CK	32.23	40.10	40.87	41.40	44.50	45.83	52.00	58.13	66.67
	极差		T	0.40	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60	0.70	0.70	0.87
			CK	0.43	0.60	0.70	0.60	0.60	0.60	0.70	0.73	0.90
	T与CK极差的差值			-0.03	-0.10	-0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	-0.03

2.1.2 不同烘烤工艺的烤房内湿度变化比较

由表2可知,从垂直湿度平均值看,顶棚均是T处理温度低于CK的,中棚和底棚均是T处理温度高于CK的;从水平湿度平均值看,前部、中部和尾部,T处理的湿度均高于CK的。从不同烘烤工艺的湿度

极差来看,垂直湿度极差均大于水平湿度极差,表明烤房内垂直湿度差异大于水平湿度差异;从不同烘烤工艺的垂直湿度和水平湿度的极差的差值来看,T处理的极差与CK处理的极差的差值均小于等于0,表明T烘烤工艺的烤房内湿度较为均匀。

表2 不同烘烤工艺的烤房空气湿度

Table 2 Barn air humidity under different curing processes												%
比较方式	统计量	位置	处理	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次	第9次
垂直	均值	顶棚	T	94.67	91.37	87.63	78.80	70.07	61.03	39.60	29.93	19.83
			CK	95.53	94.63	89.07	82.03	74.70	65.53	44.33	33.90	22.43
		中棚	T	98.13	96.63	87.47	80.30	70.27	59.63	39.60	30.47	21.73
			CK	95.63	93.90	86.97	78.90	69.47	58.43	39.40	29.43	20.83
		底棚	T	98.33	96.63	90.27	83.13	73.90	65.43	43.43	34.40	22.03
			CK	90.17	88.57	84.33	75.30	66.73	57.13	39.10	28.63	19.53

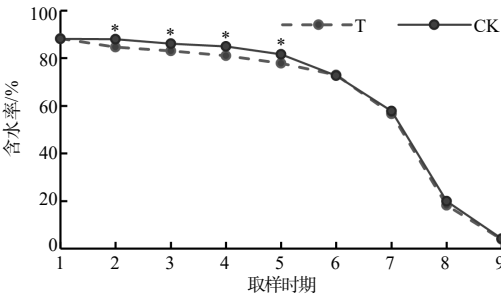
表2(续)

比较方式	统计量	位置	处理	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	第8次	第9次
水平	极差	前部	T	3.66	5.26	2.80	4.33	3.83	5.80	3.83	4.47	2.20
			CK	5.46	6.06	4.74	6.73	7.97	8.40	5.23	5.27	2.90
			T与CK极差的差值	-1.80	-0.80	-1.94	-2.40	-4.13	-2.60	-1.40	-0.80	-0.70
	均值		T	95.63	94.13	88.03	80.30	71.63	62.20	41.33	31.67	21.27
			CK	94.03	91.60	87.37	78.97	70.75	60.53	41.07	30.73	21.00
			T与CK均值的差值	1.60	2.53	0.66	11.33	10.88	1.67	0.26	1.09	0.27
	极差	中部	T	95.33	93.83	87.73	80.07	71.37	62.00	41.20	31.60	21.17
			CK	93.73	92.33	87.07	78.73	70.27	60.33	40.93	30.63	20.90
			T与CK极差的差值	1.60	1.50	0.66	11.34	11.10	1.67	0.27	1.07	0.27
	均值		T	95.17	93.67	87.60	79.87	71.23	61.90	41.10	31.53	21.17
			CK	93.57	92.17	86.93	78.53	70.13	60.23	40.83	30.60	20.90
			T与CK均值的差值	1.60	1.50	0.67	11.34	11.10	1.67	0.27	1.07	0.27
极差	尾部	T	0.46	0.46	0.43	0.43	0.40	0.30	0.23	0.14	0.10	
		CK	0.46	0.73	0.44	0.44	0.62	0.30	0.24	0.13	0.10	
		T与CK极差的差值	0.00	-0.27	-0.01	-0.01	-0.22	0.00	-0.01	0.01	0.00	

2.2 烘烤过程中物质动态变化

2.2.1 烟叶水分含量动态变化

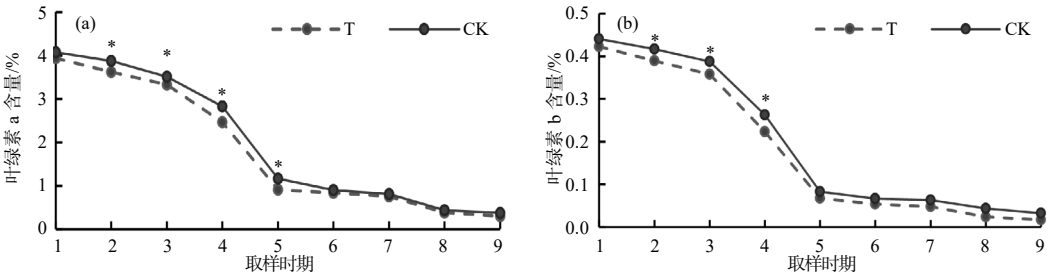
由图3可知，2个处理在整个烘烤过程中含水率的变化趋势基本一致，失水速率均呈现慢—快—慢的变化趋势。在黄片期(第1~6次取样时期)，T处理的含水率低于CK的，其中，第2~5次取样时期的含水率显著低于CK的。可见，2种烘烤工艺下烟叶水



*表示同一取样时期不同处理间的差异具有统计学意义($P<0.05$)。

图3 烟叶水分含量动态变化

Fig.3 Dynamic changes in moisture content in tobacco leaves



*表示同一分图同一取样时期不同处理间的差异具有统计学意义($P<0.05$)。

(a) 叶绿素a; (b) 叶绿素b

图4 烟叶叶绿素含量的动态变化

Fig.4 Dynamic changes in chlorophyll content in tobacco leaves

由图5可知，2种烘烤工艺下类胡萝卜素的含量均呈下降趋势，且T处理的类胡萝卜素含量在整个

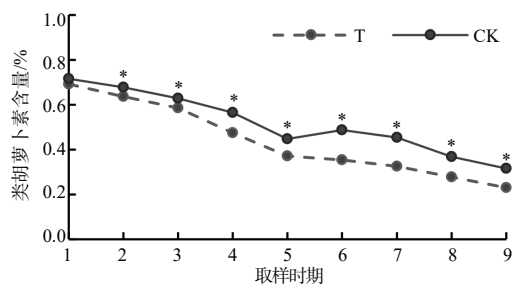
分含量主要是在黄片期出现差异，具体表现为T处理较CK失水速率快，烟叶含水量低，可减少定色期排湿压力，防止烟叶烤黑。

2.2.2 烟叶色素含量动态变化

由图4可知，2种烘烤工艺下叶绿素a和叶绿素b含量的变化趋势基本一致，降解速率均呈现慢—快—慢的变化趋势。2种烘烤工艺的叶绿素降解主要发生在黄片期，即前6次取样时期，后期2种烘烤工艺的叶绿素含量均趋于稳定，变化较小。从整体上看，在第2~5次取样时期，T处理的叶绿素a含量显著低于CK的；在第2~4次取样时期，T处理的叶绿素b含量显著低于CK的。推测T处理的叶绿素a和叶绿素b含量小于CK的主要原因可能是黄片期T处理的空气湿度较大，有利于叶绿素降解。综上可知，采用稳温降湿烘烤工艺能提高叶绿素的降解速率，促进烟叶变黄，减少烤后青烟的产生。

烘烤时期都显著低于CK的，推测可能是因为在黄片期T处理的空气湿度较大，降解速率也更快。由此

可以看出,采用稳温降湿烘烤工艺能加速湘烟7号中部叶类胡萝卜素的降解,为烟叶烤香提供了条件。



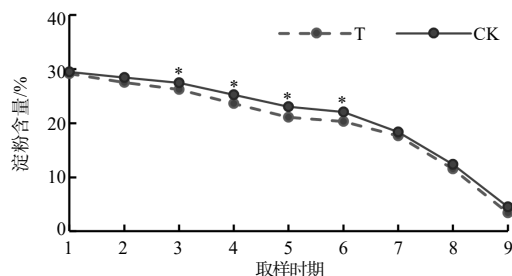
*表示同一取样时期不同处理间的差异具有统计学意义($P<0.05$)。

图5 烟叶类胡萝卜素含量动态变化

Fig.5 Dynamic changes in carotenoid content in tobacco leaves

2.2.3 烟叶淀粉含量动态变化

由图6可知,2种烘烤工艺下淀粉含量的变化趋势基本一致,在整个烘烤过程中均呈现下降的趋势。淀粉含量的差异主要出现在黄片期,即前6次取样时期,在黄片后期第3~6次取样时期T处理的淀粉含量显著低于CK的,推测可能是因为黄片期T处理的空气湿度较大,有利于淀粉降解。由此可以看出,相较于CK处理,T处理烟叶的淀粉降解更加充分,有利于提高烤后烟叶的成熟度。



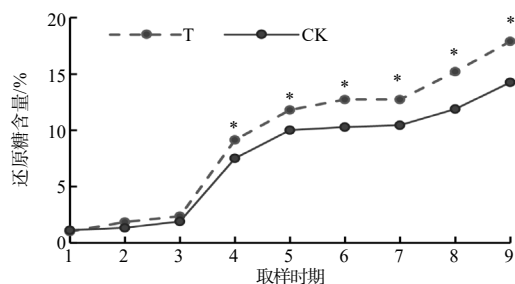
*表示同一取样时期不同处理间的差异具有统计学意义($P<0.05$)。

图6 烟叶淀粉含量动态变化

Fig.6 Dynamic changes in starch content in tobacco leaves

2.2.4 烟叶还原糖含量动态变化

由图7可知,2种烘烤工艺下,整个烘烤过程中还原糖含量均呈现由少到多的变化过程。2种烘烤工艺在黄片前期(第1~3次取样)无显著差异,但从第4次取样到烘烤结束,T处理的还原糖含量均显著高于CK的。由此可知,2种烘烤工艺在还原糖上的差异主要是从黄片后期开始并持续到烘烤结束,而T处理烟叶的还原糖含量高,有利于提高烤后烟叶的评吸质量。



*表示同一取样时期不同处理间的差异具有统计学意义($P<0.05$)。

图7 烟叶还原糖含量的动态变化

Fig.7 Dynamic changes in reducing sugar content in tobacco leaves

2.3 烤后烟叶品质比较

2.3.1 外观质量

由表3可知,从定量评价上来看,2种烘烤工艺的差异主要表现在成熟度、叶片结构、油分、色度等方面,并且这4项指标均是T处理的得分更高,尤其是油分与色度的差异显著。从外观质量总分看,T处理较CK高5.31%,差异显著。综上可见,采用稳温降湿烘烤工艺可以提高烤后烟叶的色度和成熟度,改善叶片结构紧实度,增加油分,提升烟叶整体外观质量。

表3 烟叶的外观质量

Table 3 Appearance quality of flue-cured tobacco

处理	评价方法	颜色	成熟度	叶片结构	身份	油分	色度	外观质量总分
T	定性评价	橘黄	成熟	疏松	中等	有	强	
	定量评价	8.0±0.3	8.5±0.3	8.5±0.4	8.0±0.4	(7.0±0.6)a	(7.0±0.6)a	(79.3±1.4)a
CK	定性评价	橘黄	成熟	疏松	中等	有	强	
	定量评价	8.0±0.5	8.0±0.6	8.0±0.5	8.0±0.4	(6.0±0.6)b	(6.5±0.6)b	(75.3±1.6)b

注: 同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.3.2 物理性状

由表4可知,2种烘烤工艺的单叶质量差异显著,T处理的显著大于CK的;T处理的含梗率略低

于CK的。由此可见,稳温降湿烘烤工艺下的烟叶内含物消耗较少。

表4 烟叶的物理性状

Table 4 Physical properties of flue-cured tobacco					
处理	单叶质量/g	含梗率/%	叶片厚度/mm	平衡含水率/%	叶面积质量/(g·m ⁻²)
T	(10.93±1.18)a	32.49±2.98	0.16±0.05	13.74±1.11	95.24±4.65
CK	(9.30±0.54)b	34.17±2.25	0.13±0.04	14.69±0.08	92.36±3.68

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.3.3 化学成分

由表5可知，2种烘烤工艺的总糖、还原糖、氯含量差异显著，T处理的显著高于CK的，T处理的烟碱含量和淀粉含量略低于CK的。从协调性指标

看，T处理的两糖比较CK的略高，糖碱比显著高于CK的。可见，采用稳温降湿烘烤工艺可提高烟叶糖含量，降低烟叶淀粉与烟碱含量，有利于提高烤后烟叶化学成分的协调性。

表5 烟叶的化学成分

Table 5 Chemical composition of flue-cured tobacco										
处理	总糖含量/%	还原糖含量/%	烟碱含量/%	总氮含量/%	钾含量/%	氯含量/%	淀粉含量/%	绿原酸含量/%	两糖比	糖碱比
T	(25.39±0.27)a	(15.77±0.25)a	2.96±0.04	2.09±0.01	1.74±0.11	(0.52±0.03)a	3.33±0.41	1.17±0.02	0.64±0.01	(5.28±0.09)a
CK	(23.97±0.53)b	(13.83±0.23)b	3.01±0.04	2.25±0.01	1.82±0.12	(0.48±0.02)b	3.51±0.34	1.29±0.04	0.63±0.01	(4.79±0.11)b

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.3.4 评吸质量

由表6可知，经专家评吸，2种烘烤工艺的评吸质量差异主要表现在香气量、香气质以及柔和程度这3个方面，且T处理的香气质显著优于CK的。整体上来看，T处理的烤后烟叶烟气柔和，尚透发，香气量尚足，甜感适中；CK处理的烤后烟叶烟气成

团性适中，尚透发，吸食过程中喉部略显浮刺，甜感适中。从评吸总分看，T处理较CK的高3.05%，差异显著。由此可以看出，湘烟7号中部叶采用稳温降湿烘烤工艺能提高烤后烟叶的香气质量，增加柔和程度，使其整体的评吸质量优于四步式烘烤工艺的。

表6 烟叶评吸质量

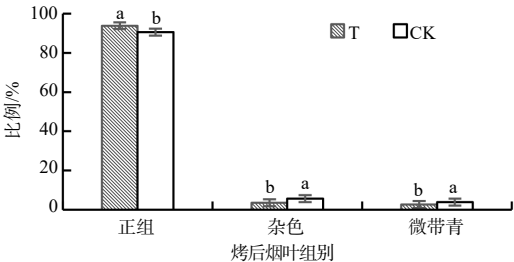
Table 6 Sensory quality of cured tobacco leaves											
处理	香气特性				烟气特性			口感特性			评吸总分
	香气质	香气量	透发性	杂气	细腻程度	柔和程度	圆润感	刺激性	干燥感	余味	
T	(13.0±0.5)a	12.5±0.3	5.0±0.3	5.5±0.4	5.0±0.3	5.5±0.3	5.0±0.2	5.0±0.3	5.5±0.3	5.5±0.2	(67.5±0.3)a
CK	(12.0±0.4)b	12.0±0.5	5.0±0.3	5.5±0.3	5.0±0.2	5.0±0.2	5.0±0.2	5.0±0.2	5.5±0.3	5.5±0.3	(65.5±0.5)b

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.4 烘烤经济效果比较

2.4.1 烤后烟叶分组统计

由图8可知，T处理烤后烟叶的正组烟叶比例较CK的高3.27个百分点，杂色和微带青烟叶比例分别



同组不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

图8 烟叶分组统计结果

Fig.8 Percentage of tobacco leaves by group

较CK的低2.08个、1.18个百分点，且均差异显著。由此可见，采用稳温降湿烘烤工艺可以显著降低烤后烟叶的青杂率，提高正组烟叶的比例。

2.4.2 烤后烟叶上等烟比例和均价

T处理和CK的上等烟率分别为59.40%、55.48%，T处理比CK的高3.92个百分点，差异显著；T处理和CK的均价分别为38.08、36.26元/kg，T处理较CK的高5.02%，差异显著。由此可知，稳温降湿烘烤工艺能提高烤后烟叶的上等烟率和均价。

2.4.3 烘烤能耗成本

T处理和CK的用电量分别为1 453.93、1 561.86

(kW·h)/房, 能耗总成本分别为843.28、905.88元/房, T处理较CK的能耗总成本降低6.91%。表明采用稳温降湿烘烤工艺可降低烘烤成本。

3 结论与讨论

烘烤是烟叶生产的重要环节, 烘烤工艺与鲜烟叶的烘烤特性相匹配才能烤出优质烟叶。烘烤过程中, 通过调控温湿度, 可使叶片内的有机物质不断发生变化, 其中淀粉、叶绿素等大分子物质逐渐被消耗分解, 转化为小分子糖类、致香类物质, 从而达到改善烟草质量的目的。当烟叶达到最佳状态时, 升高温度使烟叶失水加速, 防止烟叶进一步发生变化, 将烟叶内部的有益物质保留下来从而形成其独有的风格特色。湖南稻作烟区由于施肥水平高, 降雨量多, 其鲜烟叶的含水量较高, 叶片较为肥厚, 主脉粗大, 色素含量高, 烘烤时变黄不充分, 水分难以排出, 容易造成烟叶烤青、挂灰等现象^[18-20]。本研究对现有烘烤工艺进行优化改进, 烟叶装炕后首先将干、湿球温度同时缓慢升至36℃稳温4 h, 并保持循环风机低速运转, 促进烘烤烟叶受热均匀, 膨胀发汗, 为后续烟叶一致变黄打下基础; 其次, 提高湿球温度, 减少干、湿球温差(干球38~39℃, 湿球37~38℃), 循环风机低速运转并间歇性排湿, 这种高温保湿变黄的方法, 减少了烤房中温湿度的水平差异和垂直差异, 激活了酶活性, 促进了色素和大分子物质的降解, 有利于整个烤房中烟叶充分变黄, 降低烤青烟的比例; 最后, 为解决变黄后期因排湿难而导致挂灰等杂色烟产生的问题, 在干球升温至40~41℃后, 采取稳定干球温度、降低湿球温度(湿球温度降至35~36℃)、拉大干湿差的方法, 保持循环风机高速运转, 确保水分及时排出, 促进烟叶进一步凋萎发软。此工艺的改进提高了烟叶质量以及烘烤工艺的适配性, 有效减少了烤后青杂烟的比例和烘烤成本, 增加了烟农收入, 提高了烘烤的经济效益。

类胡萝卜素作为烤烟中一种重要的香气前体物, 在烟叶烘烤调制过程中可逐步降解转化成多种致香物质, 并影响烟叶品质的形成^[21-22]。杨伟祖等^[23]和任汝周等^[24]认为烤后烟叶中过多的类胡萝卜素对烟叶的品质有着负面影响, 并且 β -胡萝卜素含量过高会增加卷烟的杂气和刺激性, 使余味变

差, 降低卷烟的评吸质量。本研究中, 采用稳温降湿烘烤工艺的烤后烟叶, 类胡萝卜素降解速率快, 其含量低于四步式烘烤工艺的, 烤后烟叶中香气质更好, 香气量更足, 烟气更加柔和, 整体的评吸质量优于四步式烘烤工艺的。

还原糖作为烤烟的常规化学成分之一, 对烟叶的气味、外观质量等有着重要影响^[25-26]。张长云等^[27]认为糖含量越高烤烟色度越强、颜色越黄。蔡宪杰等^[28]和史宏志等^[29]认为烤后烟叶成熟度随着还原糖含量的增加而增加。张梦楚^[26]认为烟叶在反复抽吸中, 还原糖受热通过裂解反应产生了醛酮等酸性物质, 这些物质可以中和烟气中的碱性物质, 平衡酸碱度, 有效降低烤烟的刺激性, 有利于改善烤后烟叶的品质。本研究中, 采用稳温降湿烘烤工艺的烟叶还原糖含量显著高于四步式烘烤工艺的, 这有助于提升烟叶的品质。

青杂烟比例影响烟农收入。为适应鲜烟叶机械化采收和减工降本, 减少采烤次数是未来烟草调制的方向。为减少采烤次数, 6片中部烟叶一次性采收, 其鲜烟叶素质均匀度较传统采收方法(成熟2~3片采收)的差。对于一次性采收6片鲜烟叶的烘烤工艺, 既要求成熟度差的烟叶加快色素降解而尽快变黄, 又要求成熟度高的烟叶不烤枯, 若沿用传统烘烤工艺, 则容易烤出青烟或杂色烟叶。本研究中, 稳温降湿烘烤工艺与6片中部鲜烟叶的素质高度适配, 该工艺通过同步预热、间歇性排湿、高温保湿变黄等操作, 可有效促进烟叶色素和淀粉的降解, 降低青烟率; 通过稳温降湿、拉大干湿球温度差等措施, 能及时排出烟叶水分, 降低杂色烟叶比例。因此, 对于多片鲜烟叶一次性采收, 应在三段式烘烤原理指导下, 因地制宜制定烘烤工艺, 实现控青降杂, 提高烟叶可用性和烟农收入, 促进烟叶生产可持续发展。

参考文献:

- [1] 过伟民, 郑劲民, 常乃杰, 等. 基于温湿度时序数据的烟叶烘烤工艺特征分析[J]. 中国烟草学报, 2022, 28(5): 56-63.
- [2] 李思军, 毕一鸣, 侯建林, 等. 适宜稻茬烤烟中部6片烟叶一次性采收的密集烤房烘烤工艺研究[J]. 作物杂志, 2024(2): 158-164.
- [3] 朱林, 曹想, 邓小华, 等. 湘烟7号烘烤过程中烟叶失水和色素降解特性[J]. 作物杂志, 2022(5): 174-179.

- [4] 邓小华, 朱林, 李思军, 等. 稻茬烤烟中部6片烟叶一次性采收的成熟度综合评价[J]. 核农学报, 2023, 37(4): 854–864.
- [5] 李昱霖, 胡蓉花, 韩助君, 等. 不同湿球温度对中部烟叶烘烤质量的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(11): 34–38.
- [6] 李晓辉, 甄焕菊, 牛慧伟, 等. 不同烘烤工艺对红花大金元上部烟叶烘烤质量的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(5): 79–83.
- [7] 朱伟, 胡建华, 张华喜, 等. 222烘烤工艺对K326中上部叶烤后品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(2): 103–106.
- [8] 任汝周, 杨雪彪, 李佛琳, 等. 玉溪烟区K326烤烟品种干筋期烘烤工艺优化[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 213–218.
- [9] 覃潇, 姚少云, 王祖福, 等. 基于生物质颗粒燃料的低温低湿烘烤工艺对云烟87烟叶质量的影响[J]. 作物研究, 2022, 36(6): 546–550, 567.
- [10] YC/T 311—2009. 烤烟品种烘烤特性评价[S].
- [11] 杜瑞华, 周明松. 连续流动分析法在烟草分析中的应用[J]. 中国测试技术, 2007(3): 76–78.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [13] 谢怡宁, 夏冰, 陈舜尧, 等. 烤烟经济性状和品质对长叶龄烟苗延迟移栽的响应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 26–32.
- [14] 邓小华, 周冀衡, 杨虹琦, 等. 湖南烤烟外观质量量化评价体系的构建与实证分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 2036–2044.
- [15] 邓小华, 周海宽, 张守荣, 等. 适合湘南烟稻复种区的上部烟叶一次性采烤叶片数量研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(6): 22–30.
- [16] 代顺冬, 韦树谷, 黄玲, 等. 火焰光度法测定烤烟烟叶中钾的不确定度评定[J]. 化学分析计量, 2021, 30(2): 87–92.
- [17] YC/T 530—2015. 烤烟 烟叶质量风格特色感官评价方法[S].
- [18] 肖志君, 裴晓东, 邓小华, 等. 南方稻作烟区不同品种上部烟叶烘烤特性差异[J]. 核农学报, 2017, 31(11): 2213–2220.
- [19] 侯建林, 江智敏, 胡庆辉, 等. 稻茬烤烟云烟87上部6片烟叶一次性采收的烘烤工艺研究[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(1): 183–190.
- [20] 邓小华, 文伟, 裴晓东, 等. 稻作烟区不同素质上部鲜烟叶烘烤特性研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(6): 620–625.
- [21] 马彩娟, 何冰, 孙计平, 等. 烤烟类胡萝卜素降解产物的配合力分析[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(4): 465–470.
- [22] 宫长荣. 烟叶烘烤原理[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994.
- [23] 杨伟祖, 谢刚, 王保兴, 等. 烟草中 β -胡萝卜素的热裂解产物的研究[J]. 色谱, 2006, 24(6): 611–614.
- [24] 任汝周, 李佛琳, 胡小东, 等. 调制工艺对烤烟调制过程中类胡萝卜素降解以及烟叶品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 198–203.
- [25] 王欣, 许自成, 毕庆文, 等. 生态因素对烤烟还原糖、总糖含量影响之研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8): 225–228.
- [26] 张梦楚. 攀西烤烟总糖、还原糖含量及与其他质量指标关系[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [27] 张长云, 周淑平, 田晓霞, 等. 初烤烟叶颜色与化学成分关系分析[J]. 广西农业科学, 2007, 38(6): 621–624.
- [28] 蔡宪杰, 王信民, 尹启生. 成熟度与烟叶质量的量化关系研究[J]. 中国烟草学报, 2005, 11(4): 42–46.
- [29] 史宏志, 刘国顺. 烟草香味学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗 维