

李 峥,邱 坤,方 明,等. 基于形态学和色度学的烘烤过程中烟叶水分含量变化的模型[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):209-214.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.19.049

# 基于形态学和色度学的烘烤过程中烟叶水分含量变化的模型

李 峥<sup>1</sup>,邱 坤<sup>2</sup>,方 明<sup>3</sup>,谭方利<sup>3</sup>,赵东方<sup>2</sup>,赵贵斌<sup>2</sup>,张 杰<sup>1</sup>,贺 帆<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学烟草学院,河南郑州 450002; 2. 贵州省烟草公司黔东南州公司,贵州凯里 556000;

3. 湖南省烟草公司郴州市公司,湖南郴州 423000)

**摘要:**旨在建立烤烟烘烤过程中的烟叶形态指标和颜色参数与含水量的关系模型,从而为烤烟烘烤工艺的优化改良、烘烤质量的动态形成研究提供参考。以烤烟 K326 的上部叶为试验材料,采用电热式温湿度自控烤烟箱,以三段式烘烤工艺进行试验,研究烘烤过程中烟叶含水量与外观形态、颜色变化之间的规律。结果表明,在烤烟烘烤过程中叶片、整叶的总含水率及叶片的自由水含量均在定色期快速下降,主脉各含水量指标则在定色后期开始大幅度降低。烘烤过程中叶片、主脉的厚度和体积收缩率较为明显,其余形态指标在变黄期的变化均较平缓,定色期相对剧烈,干筋期又减缓;叶片正面、背面各颜色参数的变化趋势基本一致,均表现为变黄期变化幅度较大,之后趋于稳定,且叶片正面颜色的变化快于背面,主脉颜色参数的变化则明显滞后于叶片,定色末期之后的变化最显著。相关性分析表明,烟叶含水量指标与各形态指标均具有良好的相关性,与叶片正面  $a^*$  值、叶片背面  $a^*$  值、主脉  $a^*$  值和主脉  $b^*$  值的相关性较好。回归分析拟合方程的构建,实现了通过烘烤过程中叶片、主脉的形态和颜色变化快速、精准地预测叶片、主脉和整叶含水量的变化。

**关键词:**烤烟;形态学;色度学;烘烤;自由水;形态指标;颜色参数

**中图分类号:** TS452<sup>+</sup>.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)19-0209-06

烟叶烘烤的实质是通过调节采收后烟叶所处的温湿环境,进而有节奏地促进烟叶失水干燥的过程。在烟叶烘烤过程中,上、下表皮细胞的厚度、宽度以及栅栏组织、海绵组织的厚度、收缩率存在差异,宏观上烟叶形态的变化是烟叶失水干燥程度的体现<sup>[1-2]</sup>。同时,水分作为调控烟叶生理变化的重要介质,与烟叶内含物质的转化密切相关,而色素类物质含量的变化外在体现在烟叶颜色的变化<sup>[3]</sup>。随着现代仪器学科不断发展,烟叶外观颜色的检测和识别技术越发成熟,CIE(国际照明委员会)色度空间较好地实现了烟叶颜色的量化研究,目前已得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>。因此,研究烘烤过程中烟叶水分与形态、颜色变化之间的关系,对于了解烟叶品质形成、提高烟叶的可用性、实现精益烘烤具有重要意义。樊军辉等研究了不同烤房类型对烟叶烘烤过程中形态收缩、卷曲的影响,结果显示,密集烤房装烟密度大,烟叶形态变化受到限制,是导致上部叶出现光滑僵硬现象的重要原因<sup>[7]</sup>。魏硕等对比研究了烟叶带茎与不带茎烘烤过程中含水量与形态收缩的变化,结果表明,叶片厚度、主脉直径的变化与烟叶总含水量、自由水含量的关系密切<sup>[8]</sup>。谢鹏飞等研究了烟叶烘烤过程

中含水量与颜色参数变化的关系,结果表明,烟叶  $a^*$  值、主脉  $b^*$  值与含水率指标呈显著或极显著相关<sup>[9]</sup>。对于烘烤过程中烟叶水分含量与外观形态、颜色变化的关系还有待进一步探究。

为此,本研究以湖南郴州烟区所产烟草品种 K326 的上部叶为试验材料,分别探究叶片、主脉在烘烤过程中的失水规律,在前人研究的基础上进一步完善形态学指标,并采用亨特 Lab 值量化研究叶片和主脉颜色的变化,通过相关性分析和回归分析实现烟叶外观形态、颜色变化与含水量关系的定性定量研究,进而为烤烟烘烤质量的动态形成、烘烤工艺的优化改进提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验于 2017 年 3—8 月在湖南省桂阳县正和烟草工作站进行。供试烟草品种为 K326,试验田土壤为水稻土,土壤肥力中等;于 2017 年 3 月 14 日移栽,种植株行距为 50 cm × 110 cm;田间管理参照当地优质烟草栽培生产技术规范进行。选取叶色均匀且叶片大小、成熟度基本一致的上部叶(第 15~16 叶位)作为试验材料。

### 1.2 试验方法

将采收后的烟叶均匀悬挂于 2 个电热智能密集烤烟箱(由郑州智联自动化设备有限公司生产)中,同时开烤,参照三段式烘烤工艺<sup>[10]</sup>进行。烘烤开始后以 12 h 为周期,选取 20 张具有代表性的完整烟叶,用于含水量、形态指标和颜色参数的测定,为了避免取样后装烟密度及叶间隙风速对于试验误差产生影响,每次取样后选取另 1 个烤烟箱的烟叶进行

收稿日期:2018-05-14

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师资助项目(编号:2015GGJS-079);湖南省烟草公司郴州市公司资助项目(编号:201543100094001)。

作者简介:李 峥(1994—),男,河南周口人,硕士研究生,研究方向为烟草调制与加工。E-mail:tobaccolz@126.com。

通信作者:贺 帆,博士,副教授,主要从事烟草调制与加工方面的研究。E-mail:hcfany@163.com。

填充。

### 1.3 测定项目及方法

为了确保试验数据的精准性,将烟叶、主脉分为上部(第2~3支脉)、中部(第5~6支脉)和下部(第8~9支脉)3个区域。图1中的检测位点1、2、3距离主脉2 cm,检测位点4、5、6位于主脉上。

**1.3.1 烟叶水分指标的测定** 在测定总含水率时,将叶片和主脉剥离,参照YC/T 31—1996《烟草及烟草制品 试样的制备和水分测定 烘箱法》,采用烘箱法分别测量叶片、主脉的含水率,并以此为基础计算整叶(叶片+主脉)的含水率。叶片、主脉中自由水、束缚水含量的测定采用阿贝折射仪法<sup>[11]</sup>,其中测定叶片自由水、束缚水含量时用打孔器(孔径5 mm)分别选取图1中1、2、3位置的样品,测定主脉自由水、束缚水含量时用刀片切取图1中4、5、6位置的样品。

**1.3.2 烟叶形态指标的测定** 烟叶平面收缩率、烟叶卷曲度的测量参照樊军辉等的方法<sup>[7]</sup>;厚度收缩率的测量采用Progage 100测厚仪(美国Thwing-Albert公司),叶片的测量位置为图1中的1、2、3位点,主脉的测量位置为图1中的4、5、6位点;体积收缩率的测量参照钟广炎的方法<sup>[12]</sup>进行。

**1.3.3 烟叶颜色参数的测定** 采用HP-C210精密色差仪

(由深圳汉谱光彩科技有限公司生产)分别测量叶片正面、背面和主脉的亮度值 $L^*$ 、红绿值 $a^*$ 、黄蓝值 $b^*$ ,叶片的测量位点为图1中的1、2、3位点及与1、2、3位点左右对称的共6个位点,主脉颜色参数的检测点为图1中的4、5、6位点。

### 1.4 数据处理

采用Excel 2013和SPSS 22.0软件进行试验数据的处理、绘图和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 烘烤过程中烟叶总含水率的变化

烟叶烘烤是烟叶逐渐脱水干燥的过程,由图2可知,叶片、主脉以及整叶的含水率随着烘烤时间的增加均呈现不断降低的趋势,其中叶片、整叶含水率的降低幅度呈“慢—快—慢”的“S”形变化趋势,主脉含水率则表现为先慢后快的降低趋势。在0~60 h,叶片、主脉和整叶的含水率均缓慢降低;在72~108 h,叶片、整叶的含水率降低幅度较大;120 h之后,叶片基本被烤干,含水率趋于稳定,此时整叶含水率的降低幅度也逐渐减缓,主脉含水率则在96 h之后大幅度降低。整体来看,烟叶烘烤过程中主脉含水率的变化滞后于叶片和整叶的变化,叶片失水幅度在72 h后大于整叶的变化。

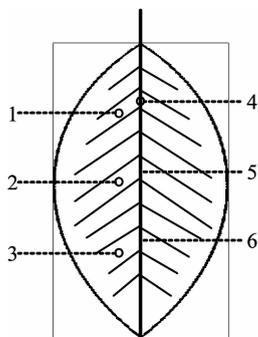


图1 烟叶检测点的选择

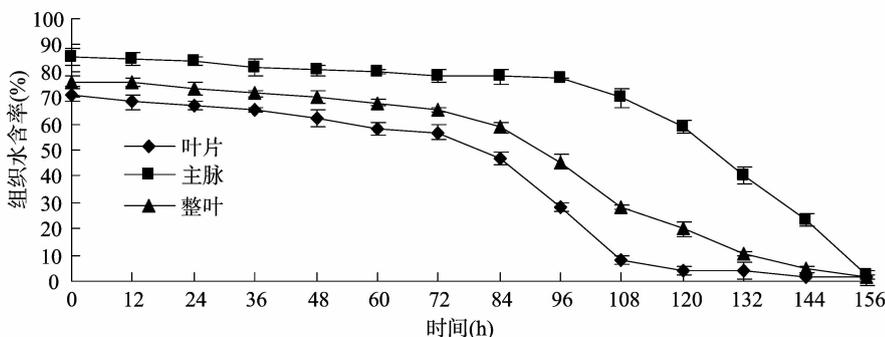


图2 烘烤过程中烟叶含水率的变化

### 2.2 烘烤过程中烟叶自由水和束缚水含量的变化

由图3-a可知,鲜烟叶中主脉自由水含量高于叶片自由水含量,烟叶在烘烤过程中,叶片、主脉的自由水含量均呈不断下降的趋势。60 h之前,叶片中的自由水含量和主脉自由水含量下降的速率和幅度近似;在72~108 h,叶片自由水含量的降低速率有所提升,定色期结束后,叶片的自由水含量几乎为0;主脉的自由水含量则在120 h之后开始迅速降低。

从图3-b可以看出,鲜烟叶叶片的束缚水含量在96 h之前高于主脉的束缚水含量。随着烘烤的进行,叶片、主脉的束缚水含量在烘烤过程中均表现为先增加后减少的趋势。其中叶片束缚水含量在0~60 h之前表现为增加的趋势,而主脉束缚水含量在96 h前不断增加,且叶片束缚水含量的增长幅度及速率快于主脉束缚水含量的增长幅度及速率。叶片束缚水含量大幅度降低的时间为72~108 h,烘烤至120 h之后,叶片束缚水含量的降低趋势逐渐稳定。主脉束缚水含量则在108 h之后开始快速降低。

### 2.3 烘烤过程中烟叶形态指标的变化

从图4-a可以看出,烟叶烘烤过程中的横向收缩率、纵向收缩率和叶面积收缩率3项平面收缩率指标的变化趋势相似,均表现为先缓慢、后加快、再趋于稳定的增长趋势。在

0~60 h,烟叶的横向收缩率、纵向收缩率及叶面积收缩率的增长幅度均较小,其中横向收缩率的增长快于叶面积收缩率,纵向收缩率的变化最慢。60 h之后进入定色期,烟叶开始大量失水,横向收缩率、叶面积收缩率开始快速增高,纵向收缩率的变化幅度虽不明显,但也出现了小幅度的跃变。108 h之后,叶片中的水分基本全干,横向收缩率、叶面积收缩率的增长趋势减缓,随着主脉不断失水干燥,烟叶的纵向收缩率在小幅度增长后也逐渐趋于稳定。

叶片及主脉的厚度、体积是构成其内部生理代谢活动的重要基础和环境<sup>[13]</sup>,从图4-b可以看出,烘烤过程中烟草叶片厚度收缩率和主脉厚度收缩率均不断提高。随着烘烤的进行,60 h之前,叶片厚度收缩率、主脉厚度收缩率的增长趋势基本同步,主脉厚度收缩率的增长幅度略高于叶片厚度收缩率。在72~84、108~120 h,叶片厚度收缩率、主脉厚度收缩率的变化分别出现交点,由于叶片在定色期大量失水,而主脉在定色期结束后仍含有部分水分,烘烤过程中叶片、主脉失水的不同步,导致叶片厚度收缩率的变化幅度在定色期高于主脉厚度收缩率,在干筋期又表现为主脉厚度收缩率的变化幅度高于叶片厚度收缩率。

由图4-c可知,叶片、主脉在烘烤过程中的体积收缩率

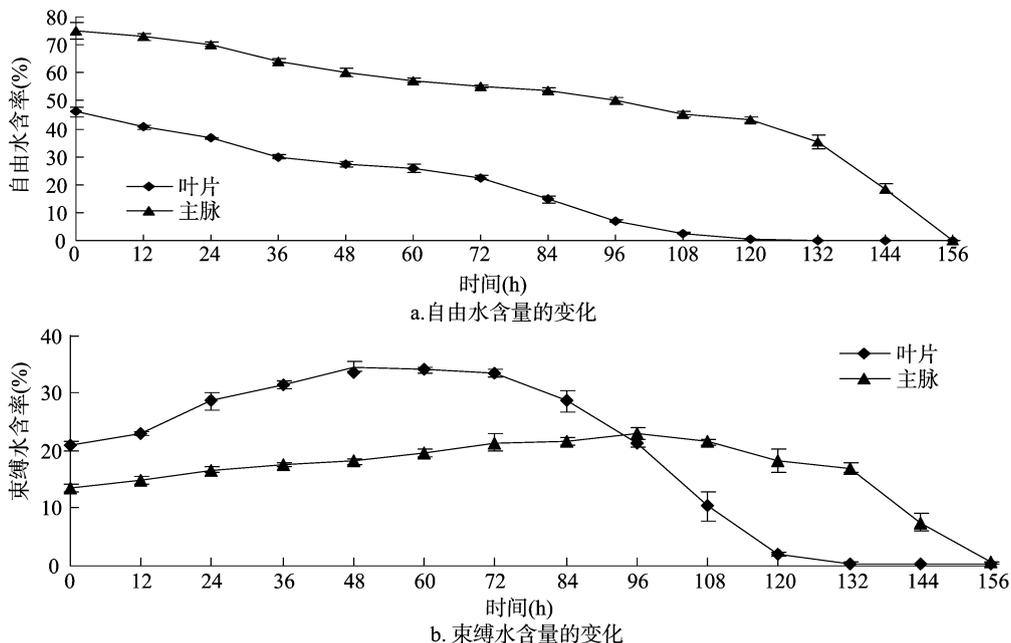


图3 烘烤过程中叶片和主脉的自由水、束缚水含量的变化

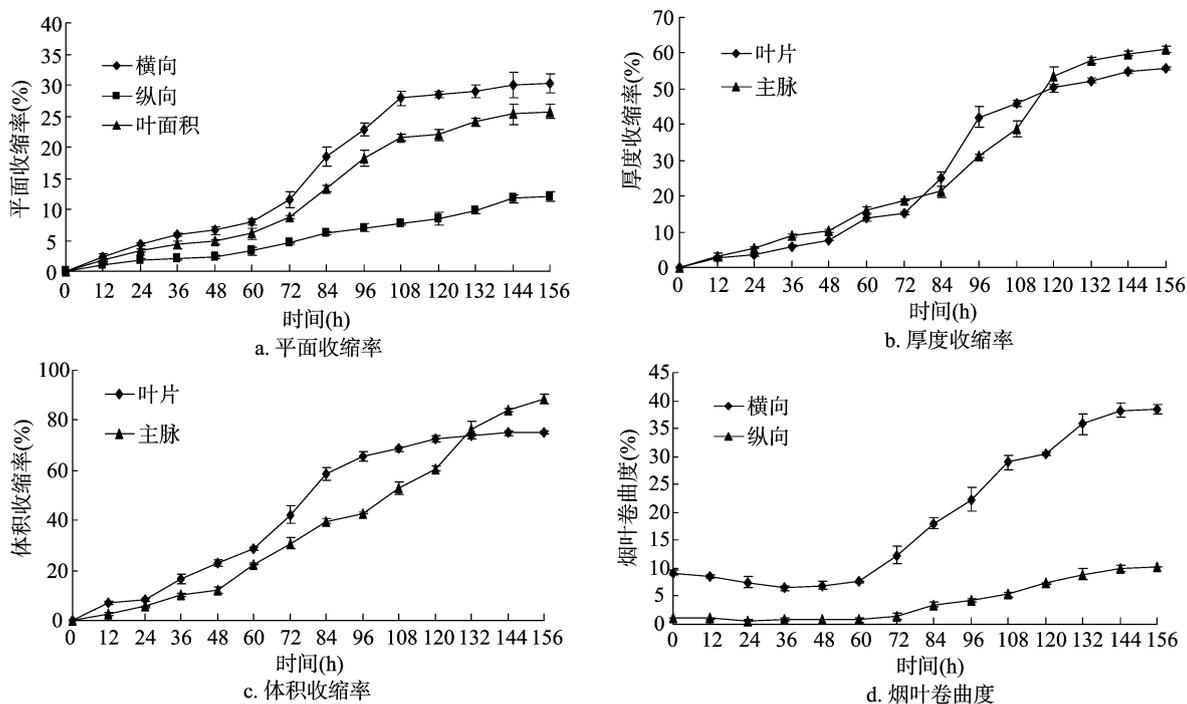


图4 烘烤过程中烟叶形态参数的变化

均呈不断增大的趋势。但叶片体积收缩率和主脉体积收缩率在不同烘烤时期的增长幅度存在差异。在60 h之前(变黄期),叶片体积收缩率的增长幅度大于主脉体积收缩率的变化。在72~108 h期间(定色期),叶片体积收缩率的增长速度呈现先快后慢的趋势,主脉体积收缩率的增长速度则不断加快。在120 h之后(干筋期),叶片的体积收缩率逐渐稳定,而主脉的体积收缩率的增长速度在进一步加快后逐渐减缓。

叶片的卷曲度与作物的光合作用、抗逆性等密切相关,是植物适应环境的一种表现。从图4-d可以看出,采收后的鲜

烟叶在自然状态下具有一定的卷曲度,且纵向卷曲度小于横向卷曲度。随着烘烤过程的进行,在60 h之前(变黄期),横向卷曲度和纵向卷曲度的变化幅度均较小,且有小幅度降低的趋势。60 h之后,烟叶烘烤进入定色期,叶片开始大量失水,这个时期烟叶的横向卷曲度和纵向卷曲度开始增长,横向卷曲度的增长幅度明显快于纵向卷曲度,烟叶出现明显的“勾尖”“卷边”现象。

#### 2.4 烘烤过程中烟叶颜色参数的变化

对K326上部叶烘烤过程中叶片与主脉亮度值( $L^*$ )变化

的分析可知,随着烘烤的进行,叶片和主脉的  $L^*$  值均表现为不断上升、在达到最高值后下降的趋势。在烘烤过程中,各时期叶片与主脉的  $L^*$  值变化幅度表现出明显差异,叶片正面的  $L^*$  值在 60 h 之前快速提高,此时烟叶正处于变黄期;而叶片背面的  $L^*$  值、主脉  $L^*$  值分别在 96、108 h 达到最高值,之后主脉  $L^*$  值急剧下降(图 5 - a)。出现上述现象,是由于烘烤进入干筋期,主脉中水分快速干燥所致。

红绿值( $a^*$  值)越大,绿色越轻,红色愈浓。从图 5 - b 可以看出,叶片、主脉的  $a^*$  值随烘烤的进行均呈现不断上升的趋势,分别表征了叶片、主脉表面颜色由绿至红的变化过程。叶片正面、背面  $a^*$  值的变化趋势基本一致,在 72 h 之前的增

长幅度较快,主脉的  $a^*$  值在 108 h 之前缓慢递增,之后迅速增大。

颜色参数中的黄蓝值( $b^*$ )越大,黄色越浓。由图 5 - c 可知,随着烘烤进程的推进,烤烟叶片、主脉的  $b^*$  值呈现出相反的变化趋势。叶片正面、背面的  $b^*$  值表现为先增长、后降低、再略有回升的变化趋势,但在不同时期的变化幅度、变化速率存在较大差异。叶片正面的  $b^*$  值在 60 h 之前快速增大,在 60 ~ 120 h 期间逐渐降低,在 120 h 之后又略有回升;叶片背面的  $b^*$  值在 108 h 之前缓慢增长,108 h 之后有明显下降的趋势,在 132 h 之后又开始增长;主脉  $b^*$  值在 48 h 之前呈降低趋势,之后缓慢递增,在 132 h 之后又稍有降低。

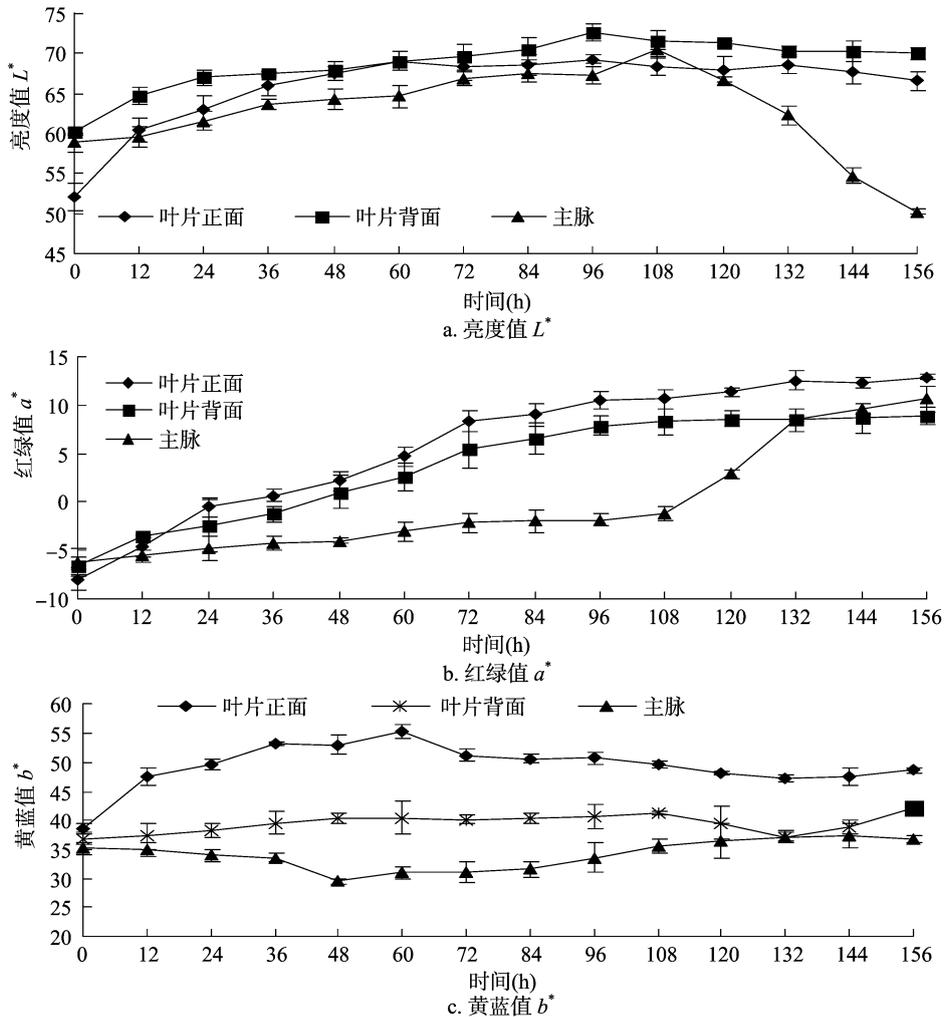


图5 烘烤过程中烟叶颜色参数的变化

2.5 烟叶水分含量与形态指标和颜色参数的相关性分析

由表 1 对烘烤过程中烟叶含水量与各项形态指标的相关性分析可以看出,叶片含水率、整叶含水率与各项形态指标均呈极显著负相关。主脉水含水率与纵向收缩率、叶面积收缩率、主脉厚度收缩率和横向卷曲度 4 项指标呈显著负相关,与主脉体积收缩率、纵向卷曲度呈极显著负相关。叶片自由水含量与各项形态学指标呈负相关,除与纵向卷曲度显著相关外,与其余指标的相关性均达极显著水平。主脉自由水含量与纵向收缩率、主脉厚度收缩率、主脉体积收缩率、纵向卷曲度的相关性达到极显著水平,与其余 5 项指标也呈显著负相关。

叶片束缚水含量除与叶片体积收缩率的相关性不显著外,与其余指标均呈显著或极显著负相关。主脉束缚水含量与纵向收缩率、主脉厚度收缩率、主脉体积收缩率、横向卷曲度呈显著负相关,与纵向卷曲度呈极显著负相关。

对烘烤过程中烟叶含水量与颜色参数中的亨特 Lab 值进行相关性分析,从表 1 可以看出,叶片正面  $a^*$  值与叶片束缚水含量、主脉束缚水含量之间的相关性不显著,与主脉水含水率、整叶含水率和主脉自由水含量 3 项指标呈显著负相关,与叶片含水率、叶片自由水含量呈极显著负相关。叶片背面  $L^*$  值与叶片自由水含量呈显著负相关, $a^*$  值与叶片含水率、主

表1 烘烤过程中烟叶水分含量与形态指标和颜色参数的相关系数

指标	相关系数						
	叶片含水率	主脉含水率	整叶含水率	叶片自由水含量	主脉自由水含量	叶片束缚水含量	主脉束缚水含量
横向收缩率	-0.964 2**	-0.587 0	-0.904 4**	-0.974 4**	-0.745 3*	-0.666 4*	-0.565 4
纵向收缩率	-0.912 9**	-0.769 6*	-0.932 7**	-0.909 9**	-0.895 3**	-0.664 4*	-0.735 0*
叶面积收缩率	-0.975 4**	-0.653 3*	-0.939 8**	-0.958 5**	-0.792 0*	-0.709 5*	-0.621 1
叶片厚度收缩率	-0.981 5**	-0.637 4	-0.939 0**	-0.947 0**	-0.770 7*	-0.731 9*	-0.599 3
主脉厚度收缩率	-0.958 8**	-0.767 4*	-0.979 1**	-0.894 4**	-0.842 4**	-0.774 5*	-0.683 8*
叶片体积收缩率	-0.883 3**	-0.504 5	-0.808 6**	-0.978 1**	-0.704 7*	-0.520 8	-0.497 5
主脉体积收缩率	-0.919 7**	-0.797 9**	-0.953 5**	-0.890 7**	-0.897 3**	-0.702 8*	-0.742 4*
横向卷曲度	-0.957 4**	-0.756 8*	-0.977 3**	-0.827 0**	-0.800 1*	-0.866 3**	-0.756 5*
纵向卷曲度	-0.919 7**	-0.844 7**	-0.976 7**	-0.765 2*	-0.837 8**	-0.879 8**	-0.808 7**
叶片正面 $L^*$	-0.239 0	-0.178 4	-0.181 8	-0.493 6	-0.227 1	-0.109 2	-0.324 3
叶片正面 $a^*$	-0.847 7**	-0.698 7*	-0.778 7*	-0.981 0**	-0.708 7*	-0.454 6	-0.452 4
叶片正面 $b^*$	0.274 3	0.170 6	0.282 5	0.401 2	0.103 8	0.567 7	0.323 5
叶片背面 $L^*$	-0.472 7	-0.148 9	-0.363 0	-0.732 2*	-0.352 0	-0.101 4	-0.104 9
叶片背面 $a^*$	-0.766 4*	-0.657 0*	-0.679 6*	-0.943 7**	-0.621 0	-0.348 8	-0.378 0
叶片背面 $b^*$	-0.304 8	-0.169 5	-0.272 8	-0.237 8	-0.234 3	-0.400 8	-0.253 8
主脉 $L^*$	0.252 7	0.531 5	0.159 7	0.105 9	0.313 6	0.206 9	0.484 2
主脉 $a^*$	-0.768 1*	-0.932 0**	-0.896 2**	-0.678 3*	-0.896 2**	-0.710 4*	-0.807 3**
主脉 $b^*$	-0.713 8*	-0.739 2*	-0.757 9*	-0.446 1	-0.708 2*	-0.703 4*	-0.853 4**

注：\* 和 \*\* 分别表示差异显著 ( $P < 0.05$ ) 和差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

脉含水率呈显著负相关,与叶片自由水含量呈极显著负相关。各项烟叶水分含量指标与主脉  $a^*$  值的相关性最强,除与叶片含水率、叶片自由水含量、叶片束缚水含量3项指标呈显著负相关外,其余水分含量指标均与主脉  $a^*$  值呈极显著负相关。主脉  $b^*$  值则与叶片自由水含量的相关性不显著,与主脉束缚水含量呈极显著负相关,与其余水分含量指标呈显著负相关。叶片正面的  $L^*$  值、 $b^*$  值,以及叶片背面的  $b^*$  值、主脉  $L^*$  值与各项水分含量指标的相关性均不显著。

## 2.6 烘烤过程中烟叶水分含量模型的建立

依据自变量对因变量作用的显著程度,选择回归方程的初始参数,以叶片含水率( $y_1$ )、主脉含水率( $y_2$ )、整叶含水率( $y_3$ )、叶片自由水含量( $y_4$ )、主脉自由水含量( $y_5$ )、叶片束缚水含量( $y_6$ )、主脉束缚水含量( $y_7$ )7项指标为因变量,以横向收缩率( $x_1$ )、纵向收缩率( $x_2$ )、叶面积收缩率( $x_3$ )、叶片厚度收缩率( $x_4$ )、主脉厚度收缩率( $x_5$ )、叶片体积收缩率( $x_6$ )、主脉体积收缩率( $x_7$ )、横向卷曲度( $x_8$ )、纵向卷曲度( $x_9$ )9项形态参数为自变量,拟合出回归方程  $y_1 \sim y_7$ 。在颜色参数方面,以叶片含水率( $y_8$ )、主脉含水率( $y_9$ )、整叶含水率( $y_{10}$ )、叶片自由水含量( $y_{11}$ )、主脉自由水含量( $y_{12}$ )、叶片束缚水含量( $y_{13}$ )、主脉束缚水含量( $y_{14}$ )7项指标为因变量,以叶片正面  $a^*$  值( $x_1$ )、叶片背面  $a^*$  值( $x_2$ )、主脉  $a^*$  值( $x_3$ )、主脉  $b^*$  值( $x_4$ )4项指标为自变量,建立回归方程  $y_8 \sim y_{14}$ 。具体公式如下:

$$y_1 = -3.305x_1 + 1.518x_2 + 1.936x_3 - 0.689x_4 - 0.528x_5 + 0.637x_6 - 0.135x_7 - 0.928x_8 + 2.728x_9 + 76.042 (R^2 = 0.999, P < 0.01);$$

$$y_2 = 0.869x_1 - 5.230x_2 - 1.765x_3 - 0.025x_4 + 0.308x_5 + 1.074x_6 - 1.055x_7 + 1.454x_8 - 4.639x_9 + 79.042 (R^2 = 0.980, P < 0.01);$$

$$y_3 = -0.669x_1 + 1.535x_2 - 1.689x_3 - 0.015x_4 - 0.473x_5 +$$

$$0.593x_6 - 0.349x_7 - 0.154x_8 - 0.939x_9 + 78.979 (R^2 = 0.999, P < 0.01);$$

$$y_4 = 0.260x_1 + 1.882x_2 - 3.489x_3 + 0.291x_4 - 0.194x_5 - 0.208x_6 - 0.035x_7 + 1.290x_8 - 1.158x_9 + 35.801 (R^2 = 0.997, P < 0.01);$$

$$y_5 = -0.815x_1 - 5.861x_2 + 0.740x_3 - 0.729x_4 - 0.628x_5 + 0.886x_6 - 1.090x_7 + 1.569x_8 - 0.797x_9 + 63.685 (R^2 = 0.965, P < 0.05);$$

$$y_6 = -1.899x_1 - 0.021x_2 + 3.637x_3 - 0.427x_4 - 0.459x_5 + 0.342x_6 + 0.346x_7 - 1.885x_8 - 0.510x_9 + 38.066 (R^2 = 0.998, P < 0.01);$$

$$y_7 = -0.301x_1 - 5.865x_2 + 2.835x_3 + 0.010x_4 - 0.032x_5 + 0.025x_6 + 0.241x_7 - 1.396x_8 + 0.769x_9 + 36.497 (R^2 = 0.961, P < 0.05);$$

$$y_8 = -2.937x_1 - 0.294x_2 - 3.829x_3 + 0.167x_4 + 183.342 (R^2 = 0.967, P < 0.05);$$

$$y_9 = 0.814x_1 - 5.100x_2 - 0.028x_3 + 0.024x_4 + 61.571 (R^2 = 0.949, P < 0.05);$$

$$y_{10} = -1.681x_1 - 2.107x_2 - 2.950x_3 - 0.311x_4 + 155.717 (R^2 = 0.977, P < 0.05);$$

$$y_{11} = -2.265x_1 + 0.012x_2 - 0.439x_3 + 1.205x_4 + 44.507 (R^2 = 0.985, P < 0.01);$$

$$y_{12} = -0.566x_1 - 3.110x_2 + 0.744x_3 - 0.038x_4 + 27.041 (R^2 = 0.917, P < 0.05);$$

$$y_{13} = -0.309x_1 - 0.638x_2 - 3.363x_3 + 0.264x_4 + 134.596 (R^2 = 0.952, P < 0.05);$$

$$y_{14} = 0.122x_1 - 1.151x_2 - 0.515x_3 + 0.419x_4 + 34.473 (R^2 = 0.885, P < 0.05)。$$

通过各回归方程的确定系数  $R^2$  可以看出,烘烤过程中烟

叶的含水量与形态指标、颜色参数的回归方程均具有较高的拟合度,方差分析结果均达到显著或极显著水平。

### 3 结论与讨论

烟叶在烘烤过程中,叶片、主脉、整叶的含水率均不断降低,叶片、整叶的失水速率呈现出变黄期慢、定色期快、干筋期再减缓的变化趋势,整叶含水率的降低速率和幅度要慢于叶片。叶片的失水干燥必然会影响到主脉水分的迁移,在定色末期,叶片水分基本全干,主脉中的水分受到水势差的作用,此时水分经由侧脉向叶片快速转移散失<sup>[14]</sup>。烟叶水分分为自由水和束缚水,主脉的自由水含量明显高于叶片,而束缚水含量表现为叶片高于主脉,表明主脉水分的流动性强于叶片。叶片的自由水、束缚水含量在定色期快速递减,主脉的自由水、束缚水含量则在定色后期开始明显降低。

烟叶形态变化的本质是由于表皮细胞、栅栏组织和海绵组织的厚度、间隙发生了改变<sup>[15]</sup>。本试验结果表明,烘烤过程中烟叶的纵向收缩率和纵向卷曲度的变化幅度较小,厚度与体积2项形态学指标的变化幅度较高,叶片的厚薄与体积大小表征了烟叶对水分的容纳能力<sup>[16]</sup>。随着叶片、主脉含水率的不断降低,最终叶片和主脉厚度、体积的变化较为明显。整体来看,各项形态指标在变黄期的变化较为平缓,变化幅度最大的时期发生在定色期,在干筋期变化又逐渐减缓,与烟叶水分的变化规律近似。就烟叶颜色的变化而言,由于变黄期的烟叶仍含有大量水分,为色素等大分子物质的降解转化提供了适宜的条件,因此叶片的颜色参数变化主要集中在变黄期,且叶片正面、背面颜色参数的变化趋势基本一致。由于烟叶为典型异面叶,叶面、叶背的组织结构、色素含量、失水特性不同<sup>[17]</sup>,叶片正面颜色的变化要略快于叶背面,这与谢鹏飞等的研究结果<sup>[9]</sup>一致。主脉颜色参数变化最显著及最高值出现的时期要滞后于叶片,主要发生在定色后期,这个时期对于主脉水分的合理调控有助于烟梗利用率的提升。

在烤烟烘烤过程中合理地调控烟叶失水量、失水速率是促进烤烟生理变化和物理变化协调统一进行的前提<sup>[18-19]</sup>。烟叶形态、颜色是烟叶内部理化变化的外在宏观体现,同时也是温湿度调节的重要参照指标。烟叶烘烤过程中的水分含量与形态、颜色密切相关,由相关性分析可以看出,烟草叶片含水率、整叶含水率、叶片自由水含量、主脉自由水含量与各项形态学指标均有显著或极显著负相关关系,其余的水含量指标也与形态参数具有较高的相关性。回归拟合方程表明,可以通过烟叶烘烤过程中形态的变化实现烟叶含水量的精准预测。颜色参数中的叶片正面 $a^*$ 值、叶片背面 $a^*$ 值、主脉 $a^*$ 值和主脉 $b^*$ 值与烟叶含水量指标的相关性较好,通过回归分析拟合方程定量地将烘烤过程中烟叶的含水量变化与形态、颜色变化联系起来。虽然本试验实现了烟叶各部分水分含量与外观形态指标、颜色参数的定性、定量分析,但仍处于初步阶段,有关烟叶烘烤过程中叶片、主脉、支脉等各部分细胞形

态、组织结构、颜色变化与含水量变化的关系还有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 王亚辉,张树堂,杨雪彪. 不同成熟烟叶在烘烤过程中的叶片组织结构变化研究[J]. 中国农学通报,2007,23(9):171-175.
- [2] 王涛,贺帆,詹军,等. 密集烘烤过程中基于色度学和形态学的烤烟外观变化与化学成分关系[J]. 华中农业大学学报,2012,31(6):765-770.
- [3] 霍开玲,宋朝鹏,武圣江,等. 不同成熟度烟叶烘烤中颜色值和色素含量的变化[J]. 中国农业科学,2011,44(10):2013-2021.
- [4] 李青山,矫海楠,王传义,等. 烟叶正背面颜色参数与色素和主要化学成分的关系研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):332-336.
- [5] 李生栋,谭方利,黄克久,等. 不同素质烟叶烘烤过程中颜色值与含氮化合物的关系分析[J]. 河南农业大学学报,2016,50(6):709-714.
- [6] 路晓崇,李昊,苏家恩,等. 基于烤烟颜色特征构建烤烟感官质量预测模型[J]. 河南农业大学学报,2016,50(4):500-505.
- [7] 樊军辉,陈江华,宋朝鹏,等. 不同烤房烘烤过程中烟叶形态和物理特性的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(6):109-114.
- [8] 魏硕,罗定棋,顾勇,等. 烤烟上部叶带茎烘烤水分状态及形态变化分析[J]. 南方农业学报,2017,48(9):1659-1664.
- [9] 谢鹏飞,邓小华,周清明,等. 密集烘烤过程中烟叶颜色、形态和水分变化及相互关系[J]. 作物研究,2012,26(5):486-490.
- [10] 宫长荣. 烟草调制学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:248-249.
- [11] 聂荣邦,唐建文. 烟叶烘烤特性研究——I. 烟叶自由水和束缚水含量与品种及烟叶着生部位和成熟度的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2002,28(4):290-292.
- [12] 钟广炎. 一种快速测定植物器官体积的方法[J]. 植物生理学通讯,1990(5):58-64.
- [13] 许守民,阎秀峰,梁秀英,等. 应用浮力法测定叶片厚度、体积、密度及内部空间体积[J]. 植物生理学通讯,1989(5):58-61.
- [14] 宋朝鹏,李生栋,魏硕,等. 低场核磁共振法测定烘烤过程中烟叶水分[J]. 中国烟草科学,2017,38(3):56-60.
- [15] 王能如,李章海,徐增汉,等. 烘烤过程中上部叶片厚度及解剖结构的变化[J]. 烟草科技,2005(9):29-31.
- [16] 樊卫国,李庆宏,吴素芳. 长期干旱环境对柑橘生长及养分吸收和相关生理的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(11):1484-1493.
- [17] 黄勇,周冀衡,刘建利,等. 不同成熟度烤烟叶细胞化学研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2007,33(5):559-563.
- [18] 李峥,邱坤,杨鹏,等. 烟叶烘烤过程中水分迁移干燥特性研究进展[J]. 昆明学院学报,2017,39(6):37-41.
- [19] 杨树勋,孟刚,荣翔麟. 烟叶烘烤过程中主脉和叶片失水特点研究[J]. 作物研究,2017,31(4):426-428.