

引用格式:

王鹏宇, 姜永雷, 余金恒, 罗刚, 胡彬彬, 黄宝瑞, 魏硕, 王卫峰. 上部烟叶带茎采收烘烤过程中叶间隙风速变化及其影响因素[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(1): 33–39.

WANG P Y, JIANG Y L, YU J H, LUO G, HU B B, HUANG B R, WEI S, WANG W F. Changes of wind speed in leaf gap and its influencing factors during curing for upper tobacco leaves harvested with stem[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(1): 33–39.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



上部烟叶带茎采收烘烤过程中叶间隙风速变化及其影响因素

王鹏宇¹, 姜永雷², 余金恒³, 罗刚⁴, 胡彬彬², 黄宝瑞⁴, 魏硕¹, 王卫峰^{1,3*}

(1.河南农业大学烟草学院, 河南 郑州 450046; 2.云南省烟草农业科学研究院, 云南 昆明 650021; 3.中国烟草总公司广西壮族自治区公司, 广西 南宁 530022; 4.广西壮族自治区烟草公司百色市公司, 广西 百色 533099)

摘要:以K326上部叶为材料, 利用传感器实时监测上部叶带茎采收和常规采收烘烤的叶间隙风速、温度和相对湿度, 通过相关性分析与逐步回归分析筛选影响叶间隙风速的主要因素, 并采用通径分析解析2种采收方式不同烘烤阶段及烘烤全程叶间隙风速的主导因素。结果表明: 带茎采收各烘烤阶段叶间隙风速均高于常规采收的; 叶间隙风速均在定色后期快速上升; 各烘烤阶段影响常规采收和带茎采收叶间隙风速的主导因素分别为水汽压亏缺(变黄阶段)、主脉含水率(定色阶段)、温度(干筋阶段)和水汽压亏缺(变黄阶段)、湿度(定色阶段)、温度(干筋阶段); 烘烤全程2种采收方式叶间隙风速的主导因素均为水汽压亏缺, 其决策系数 R^2 分别为0.962、0.877; 烘烤全程水汽压亏缺与叶间隙风速拟合结果中, 常规采收和带茎采收拟合效果最好的函数形式分别为指数函数和线性函数, 其 R^2 分别为0.977、0.971。构建各烘烤阶段叶间隙风速与水汽亏缺的三次样条函数, 带茎采收除变黄阶段以外, 拟合效果均较好, 其 R^2 均在0.800以上。烘烤过程中2种采收方式下叶间隙风速变化存在较大差异, 定色阶段叶间隙风速的主导因素不同, 可针对性地调整烘烤工艺, 改善叶间隙风速环境。

关键词: 烤烟; 上部叶; 带茎采收; 叶间隙风速; 逐步回归分析; 通径分析

中图分类号: S572.09

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2025)01–0033–07

Changes of wind speed in leaf gap and its influencing factors during curing for upper tobacco leaves harvested with stem

WANG Pengyu¹, JIANG Yonglei², YU Jinheng³, LUO Gang⁴, HU Binbin²,
HUANG Baorui⁴, WEI Shuo¹, WANG Weifeng^{1,3*}

(1.College of Tobacco, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2.Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming, Yunan 650021, China; 3.China Tobacco Corporation Guangxi Zhuang Autonomous Region Company, Nanning, Guangxi 530022, China; 4.Guangxi Zhuang Autonomous Region Tobacco Company Baise City Company, Baise, Guangxi 533099,China)

Abstract: The upper leaves of flue-cured tobacco cultivar K326 were used as materials, and the sensors were used to monitor the leaf gap wind speed, temperature and relative humidity of the upper leaves which baked after stem harvest(harvested with stem) and conventional harvest. The main factors affecting the leaf gap wind speed were screened by correlation analysis and stepwise regression analysis. Path analysis was used to analyze the dominant factors affecting leaf gap wind speed in different baking stages and in the whole baking process with the two harvesting methods. The results showed that the wind speed of leaf gap in each baking stage with stem harvest was higher than that with conventional harvest. The wind speed of leaf gap increased rapidly in the later period of color fixing. The dominant factors affecting the leaf gap wind speed with conventional harvest and stem harvest in each baking stage were water

收稿日期: 2024–05–07

修回日期: 2024–12–20

基金项目: 中国烟草总公司广西壮族自治区公司项目(202445000024032); 云南省烟草专卖局项目(2020530000241004、2021530000241008)

作者简介: 王鹏宇(1999—), 男, 贵州安顺人, 硕士研究生, 主要从事烟草种植和烟叶加工工艺研究, 1140451526@qq.com; *通信作者, 王卫峰, 硕士, 高级农艺师, 主要从事烟叶生产管理与技术推广研究, 231780841@qq.com

vapor pressure deficit(yellowing stage), main vein water content(color fixing stage), temperature(stem drying stage) and water vapor pressure deficit(yellowing stage), humidity(color fixing stage), temperature(stem drying stage). The dominant factor affecting leaf gap wind speed with the two harvesting methods during the whole baking process was water vapor pressure deficit, and the decision coefficients R^2 were 0.962 and 0.877 respectively. The fitting results of water vapor pressure deficit and leaf gap wind speed during the whole baking process showed the best fitting effects for conventional harvest and stem harvest were exponential function and linear function, respectively, the R^2 were 0.977 and 0.971, respectively. The cubic spline function of leaf gap wind speed and water vapor deficit in each baking stage was constructed. Except for the yellowing stage with stem harvest, the fitting effect was good, and the R^2 was above 0.800. There is a big difference in the change of leaf gap wind speed between the two harvesting methods during the baking process. The dominant factors of leaf gap wind speed in the color fixing stage are different. The baking process can be adjusted to improve the leaf gap wind speed environment.

Keywords: flue-cured tobacco; upper leaves; harvesting with stem; leaf gap wind speed; stepwise regression analysis; path analysis

上部烟叶烘烤过程中存在色深僵硬、化学成分不协调、香气质差、工业可用性较低等问题^[1]。烟叶间保持大小适宜、分布均匀的风速是保证烟叶黄软、协调和内在品质的重要因素^[2]。魏硕等^[3]研究干筋期不同风速、不同相对湿度、不同干球温度条件下烟叶主脉的干燥特性和烤后烟叶颜色,发现干筋期采用较高的相对湿度和较低的风速有利于提高干筋效率、改善外观质量。李昱霖等^[4]对烘烤过程中的风机频率进行优化,结果表明,当低风速阶段频率为33~37 Hz、高风速阶段频率为46~50 Hz时,烤后烟叶综合品质最优。实际生产中,为改善上部烟叶烤后质量,对上部烟叶常采用带茎采收能有效改善烤后烟叶等级结构、外观质量和经济性^[5-6]。现阶段针对带茎采收和常规采收的研究多集中在烘烤过程中的各类酶活性、内含物质变化及烤后烟叶质量的变化规律方面,而对叶间隙风速变化以及其影响因素的研究却鲜有报道。烘烤过程中烟叶叶间隙风速及其影响因素会因装烟方式的不同而发生变化^[7-9],因此,对比分析烘烤过程中常规采收与带茎采收的烟叶叶间隙风速变化,并筛选出其主要影响因素,对实现上部烟叶不同采收方式的精准烘烤及提高烤后烟叶质量具有重要意义。为此,笔者采用传感器对带茎采收和常规采收烘烤过程中叶间隙风速、温度及相对湿度进行监测,并测量计算叶片含水率、主脉含水率、水汽压亏缺以及叶面积收缩率,研究2种采收方式各阶段叶间隙风速与各影响因素的相关性,通过逐步回归分析,筛选出不同采收方式影响叶间隙风速的主要影响因素,采用通径分析解析2种采收方式不同烘烤阶段及烘烤全程叶间隙风速的主导因素,以期对2种采收方式下精准烘烤的实现,提高烤后烟叶质量提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试烤烟品种为K326。

1.2 试验设计

试验于2022—2023年在河南农业大学科教园区教学实验基地进行,土壤肥力中等,栽培管理规范,田间长势一致,选取成熟度一致的上部叶为试验对象。供试烤房为气流下降式烤房,装烟室长、宽、高分别为8.0 m、2.7 m、3.5 m,装烟层数为3层。试验设2个处理:带茎采收,采收时上二棚和顶叶分开砍收,砍成2段(每段3片),每杆40段(共120片);常规采收,一次性采收上部6片烟叶,每杆120片。

每个处理60杆,重复3次,2个处理分别放置在烤房底层左右两侧,并设置取样窗。按照当地烘烤工艺进行烘烤,烘烤过程中每隔12 h在取样窗处分别对2种采收方式进行取样,并用麻布片填充取样留下的空隙。

1.3 测定指标及方法

1) 叶间隙温湿度及风速测定。参照文献^[10]的方法,利用温湿度传感器和风速传感器测量2种采收方式的叶间隙环境,将温湿度传感器和风速传感器放置于测量点位,为了确保烘烤过程中温湿度传感器和风速传感器与叶片的充分接触,将传感器夹持于叶片内部,每隔30 min采集叶间隙的温度、相对湿度和风速。采用南京华龙电子RS485温湿度记录仪测量温度、相对湿度。工作温度为-40~120℃,测量精度为±0.5℃;相对湿度测量精度为±2%。风速记录采用全向风速传感器(北京京计朝志科技,

RS485), 测量范围 0~25 m/s, 测量精度为±0.02 m/s。

2) 烟叶形态指标的测定。参照樊军辉等^[11]的方法, 每隔 12 h 测量烟叶横向卷收缩率和纵向收缩率; 参照赵铭钦等^[12]的方法计算烟叶收缩率。

3) 含水率的测定。采用烘箱法, 每隔 12 h 取相同部位烟叶, 重复 3 次, 快速将叶片和主脉分离, 称量其质量, 放置于干燥烘箱中。105 °C 杀青 25 min, 随后于 60 °C 干燥至恒重, 称量上部叶干质量, 分别计算叶片和主脉含水率。

4) 水汽压亏缺(VPD)计算。参照路晓崇等^[8]的方法, 利用干球温度(*T*)和相对湿度(RH)计算 2 种采收方式的叶间隙水汽压亏缺(VPD)。

1.4 数据分析

将烟叶烘烤阶段划分为变黄阶段(0~84 h)、定色阶段(96~132 h)和干筋阶段(144~168 h)。利用 SPSS 23 对叶间隙风速与影响因素进行 Pearson 相关性分析和双侧显著性检验, 采用逐步回归分析筛选出不同烘烤阶段对风速影响相对较大的因素, 采用通径分析解析重要影响因素在不同烘烤阶段及不同采收方式对叶间隙风速的影响; 利用 MATLAB2015 对叶间隙风速与主要影响因素进行函数拟合。

在通径分析基础上, 采用决策系数^[13]判断各影响因素对叶间隙风速的综合影响。

2 结果与分析

2.1 烟叶烘烤过程中叶间隙风速的变化

由图 1 可知, 2 种采收方式烘烤过程中叶间隙风速均逐渐上升, 且带茎采收叶间隙风速始终大于常规采收的。在 84 h 前, 叶间隙风速处于平稳阶段, 带茎采收叶间隙风速均值较常规采收的高 0.068 m/s; 在 84~126 h 常规采收的叶间隙风速处于缓慢上升阶段, 至 148 h 叶间隙风速从

0.369 m/s 达到了 0.631 m/s; 84~134 h 带茎采收叶间隙风速处于缓慢上升阶段, 在 136~150 h 叶间隙风速快速上升, 从 0.552 m/s 上升到 0.793 m/s; 150 h 后, 2 种采收方式风速又处于一个比较平稳的阶段, 带茎采收叶间隙风速均值较常规采收的提高 28.074 个百分点。不同烘烤阶段带茎采收烟叶间隙风速: 变黄期为(0.221±0.015) m/s, 定色期为(0.338±0.062) m/s, 干筋期为(0.722±0.140) m/s。常规采收各阶段叶间隙风速如下: 变黄期为(0.153±0.022) m/s, 定色阶段为(0.281±0.054) m/s, 干筋期为(0.560±0.122) m/s。

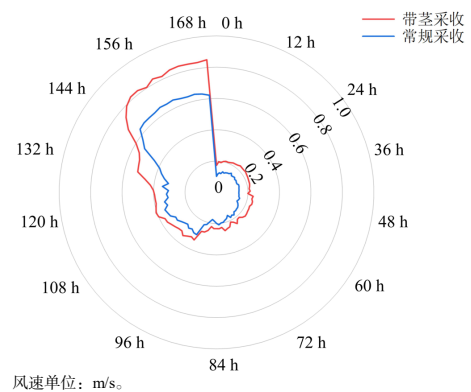


图 1 2 种采收方式烟叶烘烤过程中叶间隙的风速

Fig.1 The wind speed of leaf gap in the baking process with two harvesting methods

2.2 叶间隙风速与影响因素的相关性

由 Pearson 相关性分析(表 1)可知, 2 种采收方式下不同烘烤阶段叶间隙风速与所有影响因素的相关性较强, 均呈极显著相关($P < 0.01$)。其中温度(X_1)、收缩率(X_4)以及水汽压亏缺(X_6)与叶间隙风速呈极显著正相关; 相对湿度(X_2)、叶片含水率(X_3)和主脉含水率(X_5)与不同烘烤阶段叶间隙风速呈极显著负相关。

表 1 2 种采收方式各烘烤阶段叶间隙风速与影响因素的相关性

Table 1 Correlation between leaf gap wind speed and influencing factors in each baking stage with two harvesting methods							
烘烤阶段	指标	与叶间隙风速的相关系数		烘烤阶段	指标	与叶间隙风速的相关系数	
		常规采收	带茎采收			常规采收	带茎采收
变黄阶段	X_1	0.890**	0.985**	干筋阶段	X_1	0.999**	0.985**
	X_2	-0.813**	-0.734**		X_2	-0.971**	-0.979**
	X_3	-0.797**	-0.786**		X_3	-0.980**	-0.955**
	X_4	0.869**	0.885**		X_4	0.981**	0.965**
	X_5	-0.852**	-0.854**		X_5	-0.980**	-0.993**
	X_6	0.989**	0.996**		X_6	0.997**	0.987**

表 1(续)

烘烤阶段	指标	与叶间隙风速的相关系数		烘烤阶段	指标	与叶间隙风速的相关系数	
		常规采收	带茎采收			常规采收	带茎采收
定色阶段	X_1	0.908**	0.988**	烘烤全程	X_1	0.983**	0.981**
	X_2	-0.892**	-0.996**		X_2	-0.929**	-0.919**
	X_3	-0.970**	-0.995**		X_3	-0.774**	-0.810**
	X_4	0.923**	0.984**		X_4	0.846**	0.692**
	X_5	-0.721**	-0.910**		X_5	-0.990**	0.986**
	X_6	0.887**	0.982**		X_6	0.993**	0.994**

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_6$ 分别表示温度、相对湿度、叶片含水率、收缩率、主脉含水率和水汽压亏缺; **表示极显著相关($P < 0.01$)。

2.3 叶间隙风速与影响因素的逐步回归分析结果

以叶间隙风速为因变量, 以影响因素为自变量, 采用逐步回归分析, 建立 2 种采收方式下不同烘烤阶段的叶间隙风速与影响因素之间的回归关系, 逐步剔除不显著的变量, 最终得到逐步回归方程(表 2)。结果表明, 2 种采收方式不同烘烤阶段对叶间隙风速影响的因素存在差异。常规采收方式的变黄阶段, 叶片含水率(X_3)和水汽压亏缺(X_6)是影响叶间隙风速的主要因素; 定色阶段, 温度(X_1)、相

对湿度(X_2)、叶片含水率(X_3)和主脉含水率(X_5)是影响叶间隙风速的主要因素; 干筋阶段, 温度(X_1)和水汽压亏缺(X_6)是影响叶间隙风速的主要因素。带茎采收方式的变黄阶段, 影响叶间隙风速的主要因素为叶片含水率(X_3)和水汽压亏缺(X_6); 定色阶段, 影响叶间隙风速的主要因素为相对湿度(X_2)和水汽压亏缺(X_6); 干筋阶段影响叶间隙风速的主要因素为温度(X_1)和主脉含水率(X_5)。

表 2 2 种采收方式下各烘烤阶段叶间隙风速与影响因素的回归方程

Table 2 The regression equation of leaf gap wind speed and influencing factors in each baking stage with two harvesting methods				
采收方式	烘烤阶段	回归方程	R^2	P
常规采收	变黄阶段	$Y=0.25-0.037X_3+0.21X_6$	0.997	<0.01
	定色阶段	$Y=-0.270+0.011X_1+0.002X_2-0.339X_3+0.006X_5$	0.999	<0.01
	干筋阶段	$Y=-0.026+0.008X_1+0.006X_6$	0.995	<0.01
带茎采收	变黄阶段	$Y=0.119-0.40X_3+0.18X_6$	0.998	<0.01
	定色阶段	$Y=0.639-0.007X_2+0.008X_6$	0.994	<0.05
	干筋阶段	$Y=0.520+0.010X_1-0.832X_5$	0.992	<0.01

如表 3 所示, 通过逐步回归分析可知, 筛选出对常规采收烘烤全程风速影响最重要的 4 个影响因素, 分别为温度、叶片含水率、叶面积收缩率和水汽压亏缺, 其中温度、叶片含水率、相对湿度与叶间隙风速呈极显著负相关, 水汽亏缺与风速呈极显

著正相关。带茎采收烘烤全程对风速影响最重要的因素为叶面积收缩率、叶片含水率和水汽压亏缺, 其中叶面积收缩率和叶片含水率与叶间隙风速呈极显著负相关, 水汽压亏缺与叶间隙风速呈极显著正相关。

表 3 2 种采收方式下烘烤全程叶间隙风速与影响因素的回归方程

Table 3 The regression equation of leaf gap wind speed and influencing factors in the whole baking process with two harvesting methods				
采收方式	回归方程		R^2	P
常规采收	$Y=0.445-0.004X_1-0.81X_3-0.651X_4+0.025X_6$		0.997	<0.05
带茎采收	$Y=0.497-0.071X_4-0.490X_5+0.022X_6$		0.990	<0.05

2.4 叶间隙风速与影响因素的通径分析结果

在逐步回归分析基础上, 采用通径分析方法分析各重要影响因素对 2 种采收方式不同烘烤阶段叶间隙风速的影响。由表 4 可知, 在不同烘烤阶段, 各影响因素对叶间隙风速的影响有明显差异。变黄

阶段, 对叶间隙风速直接作用最大的因素均是水汽压亏缺(常规采收 $P_i=0.851$, 带茎采收 $P_i=0.910$), 为正向影响; 间接作用最大的因素均为叶片含水率(常规采收 $\sum r_{ij}P_j=-0.602$, 带茎采收 $\sum r_{ij}P_j=-0.670$), 为负向影响。定色阶段, 对常规采收叶间隙风速直接

作用最大因素为温度($P_i=1.100$), 为正向影响, 间接作用最大的因素为相对湿度($\sum r_{ij}P_j=-1.331$), 为负向影响; 对带茎采收直接作用最大的因素为相对湿度($P_i=-0.782$), 为负向影响, 而间接作用最大的因素为水汽压亏缺($\sum r_{ij}P_j=0.762$), 为正向影响。干筋阶段, 对常规采收叶间隙风速直接作用最大的因子为温度($P_i=0.667$), 为正向影响, 间接作用影响最大的因素为水汽压亏缺($\sum r_{ij}P_j=0.663$), 为正向影响; 对带茎叶间隙风速直接作用最大的因子为主脉含水率($P_i=-0.643$), 为负向影响, 而间接作用最大的因子为温度($\sum r_{ij}P_j=0.624$), 为正向影响。总体看来, 对常规采收叶间隙风速影响最显著的因素为水汽压亏缺(变黄阶段, 途径系数 $P_{ij}=0.989$)、主脉含水率(定色阶段 $P_{ij}=-0.988$)和温度(干筋阶段 $P_{ij}=0.989$); 而对带茎采收叶间隙风速影响最显著的

因素为水汽压亏缺(变黄阶段 $P_{ij}=0.996$)、相对湿度(定色阶段 $P_{ij}=-0.997$)和温度(干筋阶段 $P_{ij}=0.988$)。

烘烤全程, 对常规采收叶间隙风速直接作用最大的因素为水汽压亏缺($P_i=1.149$), 间接作用最大的影响因素为温度($\sum r_{ij}P_j=1.209$), 均为正向影响; 对带茎采收叶间隙风速直接作用最大的因素为水汽压亏缺($P_i=0.661$), 间接作用最大的因素为叶面积收缩率($\sum r_{ij}P_j=0.693$), 均为正向。鉴于各影响因素对叶间隙风速的直接影响和间接影响存在差异, 为检出主要指标, 引入决策系数, 从而确定不同采收方式叶间隙风速主要影响因素。从决策系数 R^2 来看, 常规采收和带茎采收叶间隙风速最大的决策因子均为水汽压亏缺, 决策系数分别为 0.962、0.877。由此可知, 水汽压亏缺是影响 2 种采收方式叶间隙风速的主导因素。

表 4 2 种采收方式下烘烤过程中叶间隙风速与影响因素的通路分析

Table 4 Path analysis of leaf gap wind speed and influencing factors in the baking process with two harvesting methods

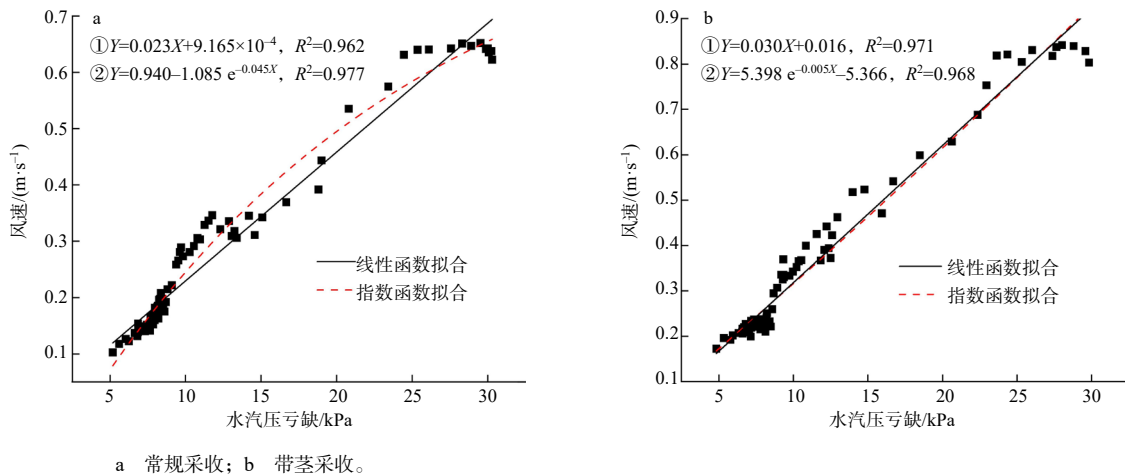
采收方式	烘烤阶段	自变量	简单相关系数 r_i	直接通路系数 P_i	间接通路系数 $r_{ij}P_j$						通路系数 P_{ij}	决策系数 R_i^2	
					X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6			
常规采收	变黄阶段	X_3	-0.797	-0.195						-0.602	-0.602	-0.797	0.273
		X_6	0.989	0.851			0.138				0.138	0.989	0.959
	定色阶段	X_1	0.908	1.100		-0.359	0.245		-0.009		-0.123	0.977	0.788
		X_2	-0.892	0.351	-1.086		-0.254		0.009		-1.331	-0.980	-0.749
		X_3	-0.970	-0.260	-1.071	0.342			0.008		-0.721	-0.981	0.437
		X_5	-0.721	0.010	-1.037	0.301	-0.262				-0.998	-0.988	-0.015
	干筋阶段	X_1	0.999	0.667						0.322	0.322	0.989	0.888
		X_6	0.997	0.324	0.663						0.663	0.987	0.541
	烘烤全程	X_1	0.983	-0.227			0.430	-0.345		1.124	1.209	0.982	-0.498
		X_3	-0.774	-0.532	0.184			0.389		-0.813	-0.240	-0.772	0.541
		X_4	0.846	-0.393	-0.199		0.527			0.811	1.139	0.746	-0.819
		X_6	0.993	1.149	-0.222		0.307	-0.312			-0.227	0.922	0.962
X_3		-0.786	-0.117						-0.670	-0.670	-0.787	0.170	
X_6		0.996	0.910			0.086				0.086	0.996	0.985	
带茎采收	定色阶段	X_2	-0.996	-0.782						-0.215	-0.215	-0.997	0.946
		X_6	0.982	0.220		0.762					0.762	0.982	0.384
	干筋阶段	X_1	0.985	0.361					0.627		0.624	0.988	0.581
		X_5	-0.993	-0.643	-0.340						-0.350	-0.983	0.864
	烘烤全程	X_4	0.692	-0.052					0.282	0.463	0.745	0.693	-0.075
		X_5	-0.986	-0.376				0.039		-0.650	-0.611	-0.987	0.600
X_6	0.994	0.661				-0.036	0.370			0.334	0.995	0.877	

2.5 2种采收方式下叶间隙风速与关键影响因素的拟合分析

2.5.1 烘烤全程叶间隙风速与关键影响因素的拟合分析结果

分别采用线性函数、指数函数拟合分析 2 种采收方式下烘烤全程叶间隙风速与主导因素(水汽压

亏缺)的关系, 结果(图 2)显示, 2 种采收方式下烘烤全程叶间隙风速均与水汽压亏缺呈极显著正相关($P<0.01$), 其中, 常规采收烘烤全程叶间隙风速与水汽压亏缺的指数函数拟合效果最好($R^2=0.977$), 带茎采收烘烤全程叶间隙风速与水汽压亏缺的线性函数拟合效果最好($R^2=0.971$)。



a 常规采收; b 带茎采收。

图2 2种采收方式下烘烤全程叶间隙风速与水汽压亏缺拟合结果

Fig.2 The fitting results of leaf gap wind speed and water vapor pressure deficit in the whole baking process with two harvesting methods

2.5.2 各烘烤阶段叶间隙风速与关键影响因素的拟合效果

由于烘烤具有阶段性的特点,因此采用三次样条函数拟合分析各烘烤阶段叶间隙风速(Y)与主导因素(水汽压亏缺, X)的关系,结果(表5)显示,2种采收方式下各烘烤阶段叶间隙风速均与水汽压

亏缺呈显著正相关($P < 0.05$)。常规采收叶变黄阶段与定色阶段间隙风速与水汽压亏缺的三次样条函数拟合效果最优(决定系数分别为0.885和0.928);带茎采收干筋阶段叶间隙风速与水汽压亏缺的三次样条函数拟合度最高($R^2 = 0.980$)。

表5 2种烘烤方式各烘烤阶段叶间隙风速与水汽压亏缺的三次样条函数拟合方程

Table 5 The cubic spline function fitting effect of leaf gap wind speed and water vapor deficit in each baking stage with two harvesting methods

采收方式	烘烤阶段	样条函数方程	R^2	P
常规采收	变黄阶段	$Y = 0.006X^3 - 0.119X^2 + 0.792X - 1.657$	0.885	<0.05
	定色阶段	$Y = 0.002X^3 - 0.075X^2 + 0.964X - 3.803$	0.928	<0.05
	干筋阶段	$Y = 0.0002X^3 + 0.013X^2 - 0.226X + 1.558$	0.970	<0.05
带茎采收	变黄阶段	$Y = -0.001X^3 - 0.003X^2 + 0.608X - 0.041$	0.758	<0.05
	定色阶段	$Y = 0.007X^3 - 0.232X^2 + 2.556X - 9.054$	0.847	<0.05
	干筋阶段	$Y = -0.003X^3 + 0.022X^2 - 0.421X - 3.083$	0.980	<0.05

3 讨论

本研究结果表明,2种采收方式对烟叶间隙风速的影响存在差异。2种采收方式下叶间隙风速整体呈现不断增大的趋势,各烘烤阶段带茎采收叶间隙风速均高于常规采收的,可能是由于带茎采收烟叶倒置悬挂于烤房内,烟叶间空隙较大,风阻较小,通风排湿更为顺畅^[14-15]的缘故。此外,2种采收方式叶间隙风速均在定色后期至干筋前期快速上升,这可能是因为此阶段内烟叶叶片基本全干,烟叶结构稳定,烟叶体积收缩,叶间隙变大,风阻减小^[16]。其中带茎采收叶间隙风速快速上升阶段起始时间较常规采收叶间风速快速上升阶段起始时间慢了10h,这可能是因为带茎采收烘烤过程中茎秆水分向叶片迁移导致叶片干燥速率慢于常规采收的^[17]的缘故。

研究2种采收方式下各烘烤阶段影响叶间隙风速变化的因素,结果表明,在变黄阶段,常规采收

与带茎采收对叶间隙风速影响最显著的因素为水汽压亏缺,此阶段烟叶内生理生化反应较充分,烟叶整体变黄^[6],变黄前期干湿球温差较小,烤房内烟叶处于相对独立的环境,烤房内相对湿度较高,空气水汽压亏缺相对较小,空气干燥能力较弱;变黄后期开始升温排湿,水汽压亏缺逐渐变大,空气干燥能力增强,风速也随之变大^[8]。在定色阶段,影响常规采收叶间隙风速变化的主导因素是主脉含水率,由于定色阶段叶片水分大幅度降低,且在定色中后期叶片逐渐干燥,主脉成为烤房内水分的主要来源^[18],对烟叶叶间隙风速变化有较大影响^[8-9]。而此阶段,影响带茎采收叶间隙风速变化的主导因素为相对湿度。烤房环境的相对湿度的高低代表烟叶失水量的大小,直接影响烤房内湿球温度以及烤房排湿的快慢,带茎采收在烘烤过程中茎秆水分向主脉和叶片迁移^[17],此阶段内叶片和主脉水分大量向空气散失^[19],在热风循环下烤房内相对湿度变化

较大,使烤房内空气干燥能力发生变化,进而引起风速变化。

干筋阶段,影响常规采收和带茎采收叶间隙风速变化的主导因素均为温度。定色后期和干筋期的主要目的是使烟筋失水干燥^[20],2种采收方式下叶片基本干燥,加之进入干筋期后带茎采收茎秆含水率远低于主脉含水率^[21],主脉成为烤房内水汽的主要来源,随着温度的提高,烟叶主脉水分向烤房内散失,空气含湿量不断变化,进而影响风速变化。

在烘烤全程,水汽压亏缺为影响常规采收和带茎采收的主导因素,风作为烘烤过程中烤房内外能量与水分交互的重要介质,随着烘烤的进行,2种采收方式叶间隙温度升高,相对湿度降低,叶片含水率和主脉含水率不断降低,空气水汽压亏缺不断升高,空气干燥能力大幅度提高,使风速不断发生变化^[16]。

4 结论

烘烤过程中,带茎采收和常规采收的上部烟叶的叶间隙风速均呈现逐渐上升趋势,在定色后期叶间隙风速快速上升,其中带茎采收叶间隙风速快速上升阶段起始时间较常规采收推迟了 10 h。不同烘烤阶段带茎采收烟叶叶间隙风速:变黄期为(0.221±0.015) m/s,定色期为(0.338±0.062) m/s、干筋期为(0.722±0.140) m/s。常规采收各阶段叶间隙风速如下:变黄期为(0.153±0.022) m/s,定色阶段为(0.281±0.054) m/s,干筋期为(0.560±0.122) m/s。

影响常规采收各烘烤阶段对叶间隙风速的主导因素分别为水汽压亏缺(变黄阶段)、主脉含水率(定色阶段)和温度(干筋阶段);而影响带茎采收叶间隙风速的主导因素为水汽压亏缺(变黄阶段)、相对湿度(定色阶段)和温度(干筋阶段)。水汽压亏缺是影响烘烤全程叶间隙风速主导因素,决策系数 R^2 分别为 0.962、0.877。

烘烤全程水汽压亏缺与叶间隙风速拟合结果中,常规采收和带茎采收拟合效果最好的表达分别为指数函数的和线性函数,其 R^2 分别为 0.977、0.971。构建 2 种采收方式各烘烤阶段叶间隙风速与水汽亏缺的三次样条函数,其中常规采收的拟合效果较好,其 R^2 均在 0.850 以上,带茎采收除变黄阶段以外,其 R^2 均在 0.800 以上。

参考文献:

[1] 陈颐,赵应伟,徐安传,等.采收成熟度对 K326 鲜烟叶素质及产质量的影响[J].西南农业学报,2019,32(3):659-664.

- [2] 陈家鼎,王爱霞,段宏群,等.风机变频调速对烤后烟叶质量的影响研究进展[J].现代农业科技,2022(21):187-190.
- [3] 魏硕,谭方利,高娅北,等.基于 Weibull 函数的烤烟干筋期干燥动力学及颜色分析[J].南方农业学报,2018,49(2):333-339.
- [4] 李昱霖,刘明宏,刘家旺,等.响应面法优化烟叶变频烘烤工艺[J].中国烟草学报,2021,27(1):83-89.
- [5] 仙立国,黄一兰,王松峰,等.烤烟品种翠碧一号上部叶适宜采收方式研究[J].中国烟草科学,2020,41(4):90-94.
- [6] 刘峰峰,孟霖,何结望,等.不同采收方式上部烟叶外观质量及抗氧化特性分析[J].烟草科技,2024,57(2):37-44.
- [7] 宋宗昊,王爱霞,赵浩宾,等.烤烟箱式烘烤中热湿环境与叶间隙风速分析[J/OL].西北农林科技大学学报(自然科学版),2025(3):1-10.[2025-02-21].<https://doi.org/10.13207/j.cnki.jnwafu.2025.03.013>.
- [8] 路晓崇,苏家恩,裴晓东,等.散叶烘烤过程中叶间隙风速变化的影响因素分析[J].河南农业大学学报,2016,50(3):353-358.
- [9] 路晓崇,宋朝鹏,裴晓东,等.烤烟散叶插签烘烤过程中叶间隙风速的变化[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(1):70-75.
- [10] 路晓崇,宋朝鹏,娄元菲,等.烤烟散叶插签烘烤过程中叶温的变化[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(3):118-123.
- [11] 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.
- [12] 赵铭钦,宫长荣,汪耀富,等.不同烘烤条件下烟叶失水规律的研究[J].河南农业大学学报,1995,29(4):382-387.
- [13] 左大杰,戴文涛.基于通径分析的四川省交通碳排放驱动机理研究[J].交通运输系统工程与信息,2018,18(2):230-235.
- [14] 代丽,黄永成,童旭华,等.采收方式对烤烟上部叶香味品质的影响[J].华北农学报,2009,24(2):158-163.
- [15] 刘洪华,赵炳奇,郑洋,等.烤烟上部叶不同烘烤方式综合效果比较[J].现代农业科技,2021(16):226-227.
- [16] 刘光辉.密集烘烤风机变频调速对烘烤工艺和烟叶质量的影响[D].长沙:湖南农业大学,2010.
- [17] 魏硕,谭方利,马明,等.上部叶带茎烘烤水分迁移及形态结构变化[J].河南农业大学学报,2018,52(2):187-192,231.
- [18] 易美琴,陈文文,徐小洪,等.不同烟草品种上部烟叶的物质变化规律[J].西南师范大学学报(自然科学版),2022,47(10):79-86.
- [19] 宋朝鹏,武劲草,路晓崇,等.烟叶烘烤过程中流水线烤房的空气介质分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(11):36-42.
- [20] 李增盛,孟令峰,王松峰,等.基于图像处理的烟叶烘烤阶段判别模型优选[J].中国烟草学报,2022,28(2):65-76.
- [21] 魏硕,段史江,宋朝鹏,等.不同带茎方式烟叶烘烤过程水分迁移特性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(3):28-37.

责任编辑:罗慧敏
英文编辑:罗维