

韦克苏,涂永高,张念,等.采收成熟度对烘烤过程烟叶色素降解及抗氧化系统的影响[J].江苏农业科学,2021,49(13):176-180.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.13.034

# 采收成熟度对烘烤过程烟叶色素降解及抗氧化系统的影响

韦克苏<sup>1</sup>,涂永高<sup>1</sup>,张念<sup>2</sup>,瞿永生<sup>3</sup>,汤朝起<sup>3</sup>,武圣江<sup>1</sup>,姚晶<sup>2</sup>,李德仓<sup>1</sup>,沈晗<sup>3</sup>

(1. 贵州烟草科学研究院/烟草行业山地烤烟品质与生态重点实验室,贵州贵阳 550081;

2. 毕节市烟草公司黔西县分公司,贵州黔西 551500; 3. 上海烟草集团有限责任公司技术中心,上海 201315)

**摘要:**设置 3 个采收成熟度(尚熟、成熟、完熟)处理,对烘烤过程烟叶叶绿素和类胡萝卜素降解规律、抗氧化酶活性和相对电导率的变化进行系统研究。结果表明,(1)各个色素组分降解主要发生在变黄中后期(24~72 h),色素降解速率和烟叶变黄速率随着成熟度的提高而提高;(2)烟叶丙二醛(MDA)含量随烘烤进程逐渐升高,在 72 h 时达到峰值,成熟烟叶中的 MDA 含量低于尚熟和完熟烟叶处理;(3)不同处理烟叶抗氧化酶[过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)]活性均在随烘烤进程呈先升高后降低的趋势,且活性在变黄期达到峰值,成熟处理烟叶中的 POD、T-SOD、CAT 活性均表现出较高水平;(4)不同处理烟叶相对电导率随烘烤进程逐渐上升,完熟烟叶的相对电导率显著高于尚熟和成熟烟叶,定色中后期烟叶相对电导率明显增大,以成熟处理烟叶相对电导率最小。成熟烟叶的色素降解比例较大,MDA 含量较低,抗氧化酶活性较高,相对电导率较低,说明成熟烟叶细胞膜的完整性更好,有利于烟叶细胞内部物质的生理生化转化。

**关键词:**烤烟;成熟度;色素降解;抗氧化系统;相对电导率

**中图分类号:** TS44<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)13-0176-05

调制过程是烟叶品质形成的关键环节,烟叶在大田生育期的质量和品质特征,必须经过适当的调制过程才能充分彰显,形成符合卷烟配方要求的品质性状<sup>[1-2]</sup>。采收成熟度是烟叶调制工艺设定和调制品质形成的关键因素之一,也是决定烤后烟叶经济效益和产品质量的重要影响因素,是烟叶质量的核心<sup>[3]</sup>。大量研究已经证实,采收成熟度适宜的烟叶,经过调制之后物质转化充分、化学成分协调、感官评吸质量佳,烟叶经济性状和品质可用性较好<sup>[1,4-5]</sup>。调制后烟叶的化学物质能否充分转化与其体内细胞结构的完整性密切相关,而细胞结构的完整性在很大程度上与膜脂过氧化水平、膜系统中的酶活性有关<sup>[6-7]</sup>。已有研究大多关注于采收成熟度对烟叶理化品质差异及协调性、感官评吸质量的优劣等方面<sup>[2,4-5]</sup>,而针对调制过程中烟叶细胞衰老

程度和细胞膜透性、抗氧化酶系统动态变化模式的系统分析鲜见报道。本试验对烟叶成熟衰老进程关键色素指标含量、主要抗氧化酶活性、细胞膜相对透性的变化规律进行较系统的剖析,以期对烟叶成熟采收技术的优化提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2019 年在贵州省烟草科学研究院平坝天马试验基地进行。供试材料为主栽烤烟品种云 87,于 2019 年 2 月 15 日完成播种,并于 2019 年 4 月 27 日完成烟苗移栽,田间管理按当地优质烟叶标准化生产管理进行,2019 年 8 月中旬按照试验处理采收中部烟叶烘烤。

### 1.2 试验设计

试验按照成熟度共设 3 个处理(尚熟、成熟、完熟)。烟叶成熟度划分如下:尚熟标准为叶面淡绿色,叶片较平展,主脉发白,支脉淡绿色,绒毛部分脱落;成熟烟叶标准为叶面绿黄色,主脉全白、发亮,支脉 2/3 变白,绒毛脱落,叶尖下垂;完熟烟叶标准为叶面浅黄色或寡白,主脉支脉全白、发亮,叶面有明显的黄斑,叶尖叶边枯焦<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2020-10-29

基金项目:上海烟草集团有限责任公司科技项目(编号:K2017-1-039Z);贵州省烟草公司科技项目(编号:201813、201922)。

作者简介:韦克苏(1982—),男,广西河池人,博士,副研究员,主要从事烟叶调制品质生理研究。E-mail:weiks8816@163.com。

通信作者:沈晗,硕士,工程师,主要从事烟草原料研究工作。  
E-mail:shenhan555@163.com。

试验采用符合国烟办综[2009]418 号《国家烟草专卖局办公室关于印发烤房设备招标采购管理办法和密集烤房技术规范(试行)修订版的通知》烤房规格的密集烤房,采用挂竿装烟烘烤,装烟密度控制为 70 ~ 75 kg/m<sup>3</sup>,按照三段式烘烤工艺进行烘烤。

### 1.3 样品制备

取样时间分别为烤前 0 h(鲜样)、烤中 12 h、烤中 24 h、烤中 48 h、烤中 72 h、烤中 96 h,每次取 20 张烟叶样品,评估烟叶变黄程度后,切去烟叶尖部、基部和主脉,用半叶法将样品分为 2 份,一份用于测定叶绿素和相对电导率,另一份迅速放入液氮中冷冻,然后转移至 -80 ℃ 冰箱保存,用于检测酶活性,每个处理设置 3 次生物学重复。

### 1.4 指标检测

1.4.1 烟叶颜色变化判定及色素组分测定 烟叶外观颜色变化统计取不同烘烤阶段烟叶 20 张,人工统计按照变黄部分占整张烟叶比例;色素组分测定采用 95% 乙醇提取,分别测定 665、649、470 nm 下的吸光度并按照公式计算各个组分含量<sup>[8]</sup>。

1.4.2 烟叶丙二醛含量及抗氧化酶活性测定 丙二醛(MDA)含量采用双组分分光光度计法测定,总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性采用氮蓝四唑法测定,过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚比色

法,过氧化氢酶(CAT)酶活性测定采用紫外分光光度法<sup>[8]</sup>。

1.4.3 烟叶相对电导率测定 相对电导率采用抽气法进行测定<sup>[9]</sup>,分别测定抽滤后 25 ℃ 的电导率( $T_1$ )、煮沸 10 min 后再次冷却回到 25 ℃ 的电导率( $T_2$ ),并计算相对电导率,相对电导率 = ( $T_1/T_2$ ) × 100%。

### 1.5 数据分析

试验数据均用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 烘烤过程烟叶外观颜色变化分析

如表 1 所示,不同成熟度烟叶的变黄程度随烘烤进程逐渐提高,烟叶变黄比例因成熟度处理呈现较大差异,随着成熟度的提高,烟叶变黄比例提升加快,同一烘烤时间烟叶变黄比例表现为完熟烟叶 > 成熟烟叶 > 尚熟烟叶。烘烤 12 h 时,尚熟烟叶变黄比例低于 5%,而成熟烟叶和完熟烟叶变黄比例分别达到 5% ~ 10%、10% ~ 15%。在变黄后期(72 h)时,尚熟烟叶大部分变黄,变黄比例达 75% ~ 90%;成熟烟叶基本全黄,变黄比例为 90% ~ 100%;而完熟烟叶则全部变黄,变黄比例为 100%。

表 1 不同成熟度烟叶随烘烤进程变黄的比例

处理	烟叶变黄比例(%)					
	0 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
尚熟	0	<5	10 ~ 15	30 ~ 45	75 ~ 90	95 ~ 100
成熟	0	5 ~ 10	20 ~ 30	55 ~ 65	90 ~ 100	100
完熟	0	10 ~ 15	45 ~ 55	80 ~ 90	100	

### 2.2 烘烤过程烟叶色素降解分析

如表 2 所示,烟叶色素组分随着烘烤进程逐渐分解,各个组分含量随烘烤进程逐渐降低。从不同烘烤阶段烟叶色素组分降解量来看,在变黄中期至变黄后期(24 ~ 72 h)各个烟叶色素组分降解量均最大,该阶段不同成熟度处理烟叶总叶绿素、叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素的降解比例分别达到 64.77% ~ 71.83%、69.11% ~ 80.81%、71.85% ~ 80.51%、60.65% ~ 68.54%,其中尚熟烟叶色素组分在烘烤 48 ~ 72 h 期间的降解量最大,而成熟烟叶和完熟烟叶各个色素组分在烘烤 24 ~ 48 h 期间的降解量最大,随着采收成熟度的提高,烟叶色素组分的降解速率逐渐提高。对比不同处理烟叶类胡萝

卜素随烘烤进程的降解规律发现,成熟烟叶类胡萝卜素降解量最大,烘烤 96 h 时的降解量达到 0.144 mg/g,降解比例高达 80.90%,降解量和降解比例均高于其他 2 个处理。从不同处理总叶绿素含量和类胡萝卜素含量比值随烘烤进程的变化规律可知,总叶绿素含量和类胡萝卜素含量比值随烘烤进程逐渐降低,这说明总叶绿素的降解速率大于类胡萝卜素,随着烘烤进程的推进,类胡萝卜素在色素里面占的比例增大,烟叶颜色也逐渐由绿色转为黄色。

### 2.3 烘烤过程烟叶抗氧化系统分析

2.3.1 烘烤过程中成熟度对烟叶 MDA 含量的影响 如图 1 所示,烟叶中的 MDA 含量随烘烤进程的变化呈先升高后降低的趋势,在烘烤 72 h 时 MDA

表 2 不同成熟度烟叶烘烤中色素组分含量变化

烘烤 时间 (h)	总叶绿素含量(mg/g)			叶绿素 a 含量(mg/g)			叶绿素 b 含量(mg/g)			类胡萝卜素含量(mg/g)			总叶绿素含量/ 类胡萝卜素含量		
	尚熟	成熟	完熟	尚熟	成熟	完熟	尚熟	成熟	完熟	尚熟	成熟	完熟	尚熟	成熟	完熟
0	0.562±0.089 <sup>a</sup>	0.536±0.102 <sup>a</sup>	0.428±0.067 <sup>b</sup>	0.395±0.096 <sup>a</sup>	0.346±0.045 <sup>b</sup>	0.271±0.062 <sup>c</sup>	0.135±0.021 <sup>a</sup>	0.126±0.032 <sup>ab</sup>	0.118±0.023 <sup>b</sup>	0.168±0.014 <sup>a</sup>	0.178±0.015 <sup>a</sup>	0.155±0.033 <sup>b</sup>	3.345	3.011	2.761
12	0.526±0.076 <sup>a</sup>	0.502±0.045 <sup>a</sup>	0.373±0.061 <sup>b</sup>	0.378±0.078 <sup>a</sup>	0.312±0.085 <sup>b</sup>	0.239±0.039 <sup>c</sup>	0.125±0.022 <sup>a</sup>	0.116±0.019 <sup>b</sup>	0.102±0.026 <sup>b</sup>	0.156±0.014 <sup>a</sup>	0.159±0.019 <sup>a</sup>	0.141±0.021 <sup>a</sup>	3.372	3.157	2.645
24	0.489±0.078 <sup>a</sup>	0.427±0.065 <sup>b</sup>	0.281±0.054 <sup>c</sup>	0.278±0.056 <sup>a</sup>	0.236±0.031 <sup>b</sup>	0.111±0.025 <sup>c</sup>	0.109±0.011 <sup>a</sup>	0.085±0.013 <sup>ab</sup>	0.062±0.018 <sup>b</sup>	0.146±0.024 <sup>a</sup>	0.136±0.021 <sup>ab</sup>	0.123±0.015 <sup>b</sup>	3.349	3.14	2.285
48	0.311±0.056 <sup>a</sup>	0.258±0.065 <sup>b</sup>	0.201±0.034 <sup>c</sup>	0.163±0.032 <sup>a</sup>	0.104±0.024 <sup>b</sup>	0.067±0.019 <sup>c</sup>	0.088±0.019 <sup>a</sup>	0.045±0.018 <sup>b</sup>	0.034±0.008 <sup>b</sup>	0.096±0.018 <sup>a</sup>	0.081±0.021 <sup>b</sup>	0.086±0.011 <sup>b</sup>	3.24	3.185	2.337
72	0.198±0.021 <sup>a</sup>	0.151±0.043 <sup>b</sup>	0.141±0.023 <sup>b</sup>	0.122±0.021 <sup>a</sup>	0.075±0.012 <sup>b</sup>	0.052±0.019 <sup>b</sup>	0.038±0.007 <sup>a</sup>	0.031±0.008 <sup>ab</sup>	0.023±0.002 <sup>b</sup>	0.063±0.009 <sup>a</sup>	0.056±0.011 <sup>a</sup>	0.061±0.008 <sup>0a</sup>	3.143	2.696	2.311
96	0.094±0.013 <sup>a</sup>	0.055±0.018 <sup>b</sup>	0.048±0.011 <sup>b</sup>	0.052±0.011 <sup>a</sup>	0.028±0.008 <sup>b</sup>	0.022±0.007 <sup>b</sup>	0.024±0.002 <sup>a</sup>	0.012±0.004 <sup>b</sup>	0.009±0.002 <sup>b</sup>	0.059±0.014 <sup>a</sup>	0.034±0.009 <sup>b</sup>	0.041±0.011 <sup>b</sup>	1.593	1.618	1.171

注:不同小写字母表示同一色素含量同一烘烤时间下不同处理在 0.05 水平有显著差异。下表同。

含量出现峰值。在烘烤变黄中期(48 h)烟叶中的 MDA 含量在该阶段变化趋势因成熟度差异不明显,完熟烟叶中 MDA 含量略低于尚熟烟叶和成熟烟叶。在变黄末期和定色前期(72 h),烟叶中的 MDA 含量急剧上升,且因成熟度呈现较大差异,表现为完熟烟叶>尚熟烟叶>成熟烟叶。可知,烘烤过程中成熟烟叶 MDA 含量增长速率较慢,且变化趋势相对于尚熟、完熟烟叶更稳定,这可能与成熟烟叶较尚熟烟叶和完熟烟叶具有更强的抗逆性有关。

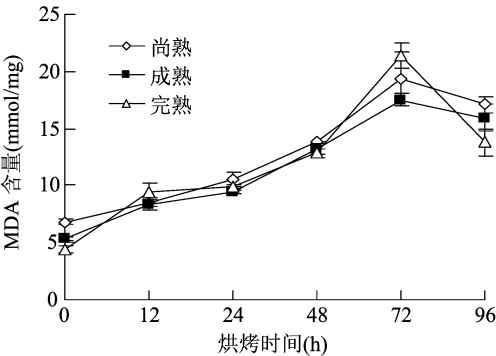


图1 烘烤过程中烤烟叶片 MDA 含量动态变化

2.3.2 烘烤过程中成熟度对烟叶 POD 活性的影响

如图 2 所示,烟叶中的 POD 活性在烘烤开始后即迅速上升,在变黄初期(12 h)至变黄中后期(48 h)基本呈一个高活性的平台期,随后 POD 活性急剧下降。在烘烤的不同阶段,烟叶中 POD 活性因成熟度处理而呈现较大差异,成熟烟叶 POD 在 12~48 h 阶段保持在较高的活性水平,高于同时期的尚熟和完熟烟叶,72 h 之后随烘烤进程急剧降低。可知,成熟烟叶 POD 活性水平在变黄定色关键阶段(12~24 h)均高于尚熟和完熟烟叶,这可能与该阶段成熟烟叶中的细胞完整性有关。

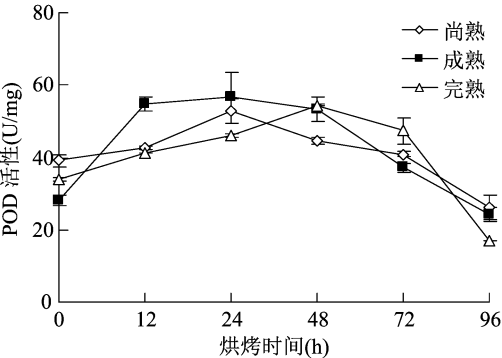


图2 烘烤过程中烤烟叶片过氧化物酶(POD)活性动态变化

2.3.3 烘烤过程中成熟度对烟叶总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性的影响

如图 3 所示,烟叶中的总超氧化物歧化酶随烘烤进程呈先升高后降低的

单峰变化趋势,但不同烟叶 T-SOD 活性峰值出现的阶段不同,由先到后分别是成熟烟叶(12 h)、尚熟烟叶(24 h)、完熟烟叶(48 h),这表明成熟烟叶中的 T-SOD 对烘烤逆境的响应最快,可以最快地保护细胞的完整性。烟叶中的 T-SOD 活性峰值表现为成熟烟叶(167.60 U/mg) > 完熟烟叶(155.72 U/mg) > 尚熟烟叶(143.72 U/mg),也表明了成熟烟叶 T-SOD 对烟叶细胞完整性的保护能力大于其他 2 个处理烟叶。

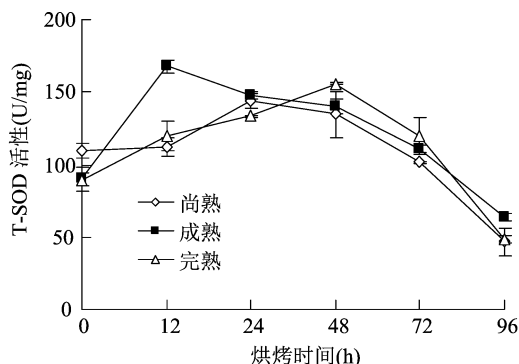


图3 烘烤过程中烟叶总过氧化物歧化酶(T-SOD)动态变化

#### 2.3.4 烘烤过程中成熟度对烟叶 CAT 活性的影响

如图 4 所示,烘烤过程中 3 种烟叶 CAT 活性动态变化均呈单峰模式,不同成熟度烟叶的 CAT 活性在烘烤开始后均呈上升趋势,且 CAT 活性在变黄中期(24 h)达到峰值,其中尚熟和成熟烟叶 CAT 活性的

峰值分别达到 21.90、20.35 U/mg,远高于完熟烟叶的 CAT 活性;随后急剧降低,至定色后期(96 h) CAT 活性大幅度降低。综上所述,在烟叶变黄期,成熟和尚熟烟叶中的 CAT 活性远高于完熟烟叶。

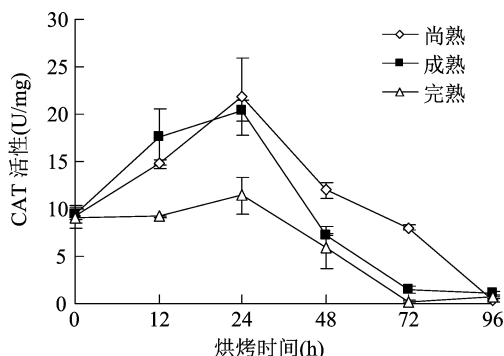


图4 烘烤过程中烤烟叶片过氧化氢酶(CAT)活性动态变化

#### 2.4 烘烤过程中成熟度对烟叶相对电导率的影响

如表 3 所示,不同成熟度烟叶相对电导率随烘烤时间逐渐升高,完熟烟叶的相对电导率显著高于尚熟和成熟烟叶;而在烘烤 0~72 h,尚熟烟叶的相对电导率略高于成熟烟叶,但差异不显著。在定色后期(96 h),不同成熟度烟叶相对电导率均有显著性差异,由高至低分别为完熟烟叶(68.53%)、尚熟烟叶(57.27%)、成熟烟叶(46.72%),表明该阶段烟叶细胞膜完整性已经被严重破坏。

表3 烘烤过程不同成熟度烟叶相对电导率的变化

成熟度	相对电导率(%)					
	0 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
尚熟	13.39 ± 2.31b	15.22 ± 2.56b	18.14 ± 2.87b	19.84 ± 3.18b	24.26 ± 4.11b	57.27 ± 5.77b
成熟	12.76 ± 2.34b	14.43 ± 1.19b	17.32 ± 1.99b	19.65 ± 2.89b	22.04 ± 2.47b	46.72 ± 6.43c
完熟	16.34 ± 2.88a	18.74 ± 2.23a	20.41 ± 3.27a	29.78 ± 3.81a	45.22 ± 3.54a	68.53 ± 7.89a

### 3 讨论

烟叶烘烤调制环节的实质是给烟叶施加了逆境环境,加快了烟叶的成熟衰老进程,加速烟叶内在物质转化速率,促使烟叶凋萎、变黄、干燥<sup>[1-2]</sup>。在逆境条件下,组织有序的代谢规律发生障碍,活性氧含量大幅度增加,高水平含量的活性氧易引起植物细胞膜脂过氧化及大分子蛋白质发生聚合,导致膜结构和功能的破坏或蛋白质变性,引起膜结构的变化及电解质外渗<sup>[6-7,10-11]</sup>。烘烤过程中烟叶细胞的膜脂过氧化水平代表了烟叶细胞结构的受破坏程度,说明了烟叶细胞生理机能的稳定性,对烟

叶物质转化和香气形成具有直接的影响<sup>[6,12]</sup>。生物膜与植物抗性关系密切,MDA 含量可以间接说明细胞膜系统受损的程度<sup>[10]</sup>。本研究中,丙二醛含量随着烘烤进程而逐渐升高,表明细胞膜受损程度随着烘烤时间而加剧,而成熟烟叶中 MDA 含量的增长速率比尚熟烟叶和完熟烟叶慢,这与宫长荣等的研究结果<sup>[6,13]</sup>相符,说明烘烤过程中成熟烟叶细胞膜受损程度低于尚熟和完熟烟叶。作为烟叶体内活性氧的清除过程中酶促反应体系的主要催化酶,POD、SOD、CAT 可以有效清除活性氧,它们的活性水平也基本决定了膜脂过氧化反应的程度<sup>[6-7]</sup>。本研究结果表明,POD、SOD、CAT 活性峰值基本都出

现在烟叶的变黄阶段(12~72 h),尽管不同抗氧化酶活性随烘烤进程的变化情况因成熟度处理有所差异,但总体表现为成熟处理烟叶中的抗氧化酶(POD、SOD、CAT)活性均不同程度高于尚熟烟叶和完熟烟叶,这与王传义等认为成熟度适宜(成熟)烟叶中 SOD、POD 活性高于成熟度偏低(尚熟)烟叶的结论<sup>[14]</sup>相符。烘烤过程中成熟烟叶能保持相对较稳定的活性状态,有利于清除细胞中的自由基和活性氧,减少对细胞完整性的伤害,保护细胞膜的完整性。

相对电导率也是衡量植物组织细胞膜透性的重要指标,相对电导率越高,表示电解质的渗漏量越多,细胞膜完整性遭到破坏的程度就越大<sup>[8-9,15]</sup>。本研究发现烘烤阶段烟叶相对电导率随着烘烤进程而逐渐升高,在变黄阶段,成熟和尚熟处理烟叶相对电导率显著低于完熟烟叶,说明成熟和尚熟处理烟叶在变黄期电解质外渗程度不大,细胞膜结构的完整性没有受到严重破坏,利于细胞内部的物质转化;而在定色后期(96 h),不同成熟度烟叶相对电导率均达显著性差异,说明该阶段烟叶细胞膜完整性已经被严重破坏。烘烤过程中不同成熟度烟叶细胞膜完整性的研究结论也可由色素物质的降解速率和降解量来佐证,研究结果表明,不同成熟度处理烟叶色素组分含量均随烘烤进程逐渐降低,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的降解速率均随着采收成熟度的提高而提高,同样的,烟叶变黄速率也因成熟度而提高。就类胡萝卜素而言,成熟烟叶中的类胡萝卜素降解量最大,降解比例高达 80.90%,高于尚熟烟叶和完熟烟叶,这与前人的研究结论<sup>[16-18]</sup>一致,这说明了烟叶细胞膜结构的完整性可为其内部的生理生化反应提供有利条件。

本研究从烘烤过程中抗氧化酶系统和相对电导率的动态变化规律,分析研究了不同成熟度处理烟叶细胞膜结构随烘烤进程的完整性和受损伤程度,再结合生产中烟叶烘烤进程中颜色的判断方法,辅以烟叶色素组分的降解速率和降解量的定量研究,结果表明成熟处理烟叶的细胞膜结构随烘烤进程的受损伤程度略轻于尚熟和完熟烟叶处理,这也可以从不同处理烟叶色素组分的降解速率和降解量方面得到佐证,再次证实了烟叶采收成熟度对烟叶烘烤品质的重要作用。然而,密集烘烤中不同成熟度烟叶品质的形成除了与烟叶中色素组分降解有关外,还与各种成熟度烟叶的物理性状、常规

理化物质和致香物质转化积累规律等密切相关<sup>[1-3,5]</sup>。为更好地了解密集烘烤中成熟度对烟叶品质形成的影响及机制,还须进行更深入而全面的研究和解析。

#### 参考文献:

- [1] 宫长荣. 烟草调制学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:1-7.
- [2] 谢已书. 烤烟成熟采收与密集烘烤[M]. 贵阳:贵州科学技术出版社,2012:1-12.
- [3] 左天觉. 烟草的生产、生理和生物化学[M]. 朱尊权,译. 上海:上海远东出版社,1993:22.
- [4] 刘海轮,张振平,常丽. 烤烟成熟采收标准与质量关系的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2002,30(2):32-36.
- [5] 赵铭钦,苏长涛,姬小明,等. 不同成熟度对烤后烟叶物理性状、化学成分和中性香气成分的影响[J]. 华北农学报,2008,23(3):146-150.
- [6] 宫长荣,陈江华,汪耀富. 烘烤中的膜脂过氧化作用及其对烟叶内在质量的影响[J]. 中国烟草学报,1999,7(3):11-16.
- [7] 韩锦峰,汪耀富,林学梧,等. 烤烟叶片成熟度与细胞膜脂过氧化及体内保护酶活性关系的研究[J]. 中国烟草学报,1994,2(1):20-24.
- [8] 宗学风,王三根. 植物生理研究技术[M]. 重庆:西南师范大学出版社,2011:166-168.
- [9] 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,2000:260-261.
- [10] Prasad T K. Mechanisms of chilling-induced oxidative stress injury and tolerance: change in antioxidant system, oxidation of proteins and lipids and protease activities[J]. The Plant Journal, 1996, 10(6):1017-1026.
- [11] 宫长荣,李艳梅,马京民,等. 烟叶在烘烤条件下活性氧自由基的产生及谷胱甘肽保护酶的变化[J]. 华中农业大学学报, 2003,22(5):508-511.
- [12] Bacon C W, Wenger R, Bullock J F. Chemical changes in tobacco during flue-curing[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1952, 44(2):292-296.
- [13] 赵铭钦,刘云,卢叶,等. 不同成熟度对烤烟叶片膜脂过氧化特性的影响[J]. 江西农业学报 2010,22(4):39-42.
- [14] 王传义,孙福山,王廷晓,等. 不同成熟度烟叶烘烤过程中生理生化变化研究[J]. 中国烟草科学 2009,30(3):49-53.
- [15] 尹航,王欣亚,金大翔,等. 低温诱导胁迫下不同烟草品种电导率及抗氧化酶活性的变化[J]. 延边大学农学学报 2018,40(1):46-52.
- [16] 王涛,吴彪,刘睿忝,等. 密集烘烤关键温度点稳温时间对烟叶颜色和色素降解的影响[J]. 作物研究 2014,28(4):388-394.
- [17] 魏硕,王涛,王松峰,等. 烤烟变黄期叶绿素降解动力学分析[J]. 中国烟草科学,2017,38(4):86-91.
- [18] 孟可爱,聂荣邦,肖春生,等. 密集烘烤过程中烟叶水分和色素含量的动态变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2006,32(2):144-148.