



烟叶采收成熟度对烘烤过程中酶促棕色化反应相关指标的影响

宋洋洋¹, 张小全¹, 杨铁钊^{1*}, 彭玉富², 王冬¹, 武云杰¹, 姚健¹, 焦绍赫¹

(1 河南农业大学烟草学院, 郑州 450002; 2 河南中烟工业有限责任公司技术中心, 郑州 450000)

摘要:以烤烟新品种‘豫烟 11 号’为试验材料, 研究未熟、成熟和过熟烟叶在常规三段式烘烤过程中水分含量、多酚氧化酶(PPO)活性和多酚类物质含量的变化特征, 以及指标间的关系, 以明确烟叶采收成熟度对酶促棕色化反应的影响及各指标之间的内在联系。结果表明: (1) 在烘烤过程中, 3 个成熟度烟叶的水分含量逐渐降低; 其 PPO 活性先缓慢下降, 再快速上升, 最后急剧下降; 而总酚与绿原酸含量先缓慢上升, 再缓慢下降, 最后快速上升。未熟和过熟烟叶的芸香苷含量变化与总酚类似, 成熟烟叶芸香苷含量呈现缓慢‘降-升-降-升’趋势; 3 个成熟度烟叶莨菪亭含量变化总体呈波动上升趋势。(2) 在酶促棕色化反应敏感期(烘烤 48~66 h), 水分含量和 PPO 活性以未熟烟叶最高, 成熟烟叶居中, 过熟烟叶最低, 总酚和绿原酸含量以成熟烟叶最高, 过熟烟叶略低, 而未熟烟叶最低; 3 个成熟度烟叶芸香苷和莨菪亭含量差异没有明显规律性。(3) 在棕色化反应敏感期, 不同成熟度烟叶 PPO 活性变化与多酚类物质积累速度均呈负相关关系, 未熟与成熟烟叶分别达到了极显著和显著水平, 而与过熟烟叶没有达到显著水平, 未熟、成熟烟叶因过高的 PPO 活性明显降低了多酚类物质积累速度, 而过熟烟叶因较低的 PPO 活性对多酚类物质的积累速度影响较小。研究认为, 适当提高烟叶田间采收成熟度, 能够有效地提高烘烤过程中烟叶的失水速率, 降低 PPO 活性, 有利于防止烟叶发生褐变, 提高烤后烟叶的外观和内在品质。

关键词:不同成熟度; 烤烟; 酶促棕色化反应; 褐变

中图分类号: Q945.6⁺5 **文献标志码:** A

Effect of Different Harvesting Maturities of Flue-cured Tobacco on Related Indicators in Enzymatic Browning Reaction during Curing

SONG Yangyang¹, ZHANG Xiaoquan¹, YANG Tiezhao^{1*}, PENG Yufu²,
WANG Dong¹, Wu Yunjie¹, YAO Jian¹, JIAO Shaohe¹

(1 College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2 Technology Center of China Tobacco Henan Industrial Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Effects of different maturities (unripe, ripe and overripe) of tobacco on the changes in the content of water, PPO activity, polyphenols of ‘Yuyan 11’ (a new kind of flue-cured tobacco) during baking process and the correlation between indexes were investigated. The results indicated that: (1) The tendency of the changes in the contents of water, PPO activity, total polyphenols in three maturity levels are similar: Water content of tobacco leaf gradually reduced; PPO activity slightly declined, then rapidly increased and finally sharply declined. The changes in the rutin content of unripe and overripe tobacco leaves were similar. The trend of rutin content in mature tobacco leaf was “decreased-increased-decreased-increased” slightly. The

收稿日期: 2014-06-20; 修改稿收到日期: 2014-09-06

基金项目: 中国烟草总公司科技项目(110201002008, TS-012011003), 河南中烟工业有限责任公司科技项目(HNZY102013002)

作者简介: 宋洋洋(1989—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事烟草遗传育种与品质改良研究。E-mail: syyl9890202@163.com

* 通信作者: 杨铁钊, 教授, 主要从事烟草遗传育种与品质改良研究。E-mail: yangtiezhao@126.com

content of scopoletin in three maturities increased as a whole. (2) During the sensitive period in enzymatic browning reaction (48—66 h in the curing process), overripe tobacco had the lowest content of water and PPO activity, the contents of total polyphenols and chlorogenic acid were slightly lower than that in mature tobacco. The water and PPO activity contents of mature tobacco leaf were lower than that in immature tobacco leaf and higher than that in over mature tobacco leaf. The contents of total polyphenols and chlorogenic acid in mature tobacco leaf were the highest. The water and PPO activity contents of immature tobacco leaf were the highest; the contents of total polyphenols and chlorogenic acid in immature tobacco leaf were the lowest. The content differences of rutin and scopoletin among three maturities had no significant regularity. (3) During 48—66 h period, there was a significant negative correlation between the change of PPO activity and the accumulate speed of polyphenols: Unripe treatment reached an extremely significant level, mature treatment reached a significant level, and overripe treatment reached an insignificant level. It suggested that high PPO activity reduced the accumulation of polyphenols in immature and mature tobacco leaf significantly, and low PPO activity effected on the accumulation of polyphenols in overripe tobacco insignificantly. The result indicate that appropriately improving the maturity of harvested flue-cured tobacco, can promote the tobacco leaf water loss effectively, so as to reduce the PPO activity during the curing process, it is beneficial to prevent browning in tobacco leaves, thus improve the appearance and intrinsic quality of cured tobacco leaf.

Key words: different maturity; flue-cured tobacco; enzymatic browning reaction; browning

酶促棕色化反应是烤烟烘烤过程中烟叶出现挂灰和杂色的重要原因之一^[1-2]。多酚类物质主要合成于质体并储存于液泡中,是多种香气成分的前体物,其成分主要是绿原酸和芸香苷^[3],在卷烟抽吸时,能够使吃味醇和。多酚氧化酶(PPO)是烟叶组织中一种重要酶类,主要存在于叶绿体中。当细胞的完整性被破坏时,多酚类物质在 PPO 的催化下被氧化成醌类物质,这些醌类物质与其他醌、氨基酸以及蛋白质聚合生成类黑素,降低了烟叶的外观和内在品质^[4-6]。不同成熟度烟叶对烘烤过程中烟叶水分含量有重要影响^[7-8]。烘烤阶段的变黄末期至定色初期,为酶促棕色化反应敏感期,PPO 活性对烟叶水分含量变化较为敏感;水分含量高的烟叶,更容易发生褐变,对多酚类物质含量变化影响也较大^[1-2,9-10]。因此,合理掌握烟叶采收成熟度,调控烘烤过程中烟叶的水分含量,能够有效抑制 PPO 活性,从而减少烘烤过程中挂灰烟、黑烟和杂色烟比例,有利于提高烟叶的外观和内在品质。目前此类

研究多集中正常成熟烟叶在烘烤过程中多酚类物质含量及 PPO 活性变化方面^[11-13],而对烘烤过程中不同成熟度烟叶水分含量、多酚类物质含量及 PPO 活性变化的研究较少。因此,为了解烟叶水分含量对烘烤过程中多酚类物质含量及 PPO 活性变化的影响,本试验设置了不同采收成熟度烟叶处理,选取酶促棕色化敏感期(试验对应时间段为烘烤过程中第 48~66 h)为重点研究对象,旨在阐明烘烤过程中烟叶水分含量、多酚物质含量和 PPO 活性变化的内在联系,为生产中合理把握烟叶采收成熟度、调控棕色化反应、减少烟叶褐变提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料及处理

试验在河南省三门峡市进行,供试品种为烤烟品种‘豫烟 11 号’。试验以烟株中部叶(从底部向上数第 12~14 片)作为样品,依据烟叶不同成熟度设置 3 个处理(表 1),采收后按照常规三段式烘烤工

表 1 不同处理鲜烟叶的采收成熟度标准

Table 1 Requirements of different harvesting maturities for fresh flue-cured tobacco

处理 Treatment	叶面特征 Appearance of leaf	叶脉 Leaf vein	茸毛 Tomenta	叶尖叶缘 Rim and tip of leaf
未熟 Unripe	叶色淡绿 Mainly green	主脉 1/2 白,支脉发青 Main veins were 1/2 white and lateral veins were completely green	较少脱落 Several tomenta fell off	叶尖微下勾 Tips warped slightly
成熟 Ripe	以黄为主,变黄面积 6~8 成 Mainly yellow, 60% to 80% area turned yellow	主脉全白发亮,支脉 2/3 变白 Main veins were completely white and 2/3 lateral veins turned white	较多脱落 A major of tomenta fell off	叶尖叶缘下卷 Rims and tips warped
过熟 Overripe	叶面基本全黄,有成熟斑 Leaves were totally yellow in color with mature spot	主支脉全白发亮 Main and lateral veins were completely white	大部分已脱落 Most of tomenta fell off	枯尖、焦边 Rims and tips were withered

艺进行烘烤。

1.2 试验取样方法

于烘烤过程中每 12 h(关键温度点每 6 h)取样 1 次(计 12 次),每次取 10 片烟叶,切去叶尖和基部各 1/3 区域,留叶中间 1/3 区域,一部分用于 PPO 活性测定,一部分在 105 ℃杀青 15 min,于 60 ℃下烘干,用粉碎机粉碎,过 80 目筛后保存用作多酚类指标的测定,所有处理 3 次重复。

1.3 测定指标和方法

烟叶含水量测定采用杀青烘干法^[14];绿原酸、芸香苷和茛菪亭等多酚类物质含量测定采用 YC/T 202-2006 标准^[15];总酚含量为绿原酸、芸香苷和茛菪亭含量之和;PPO 活性采用邻苯二酚氧化法测定^[16-17]。

1.4 数据处理

实验数据采用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2003 软件进行统计分析。

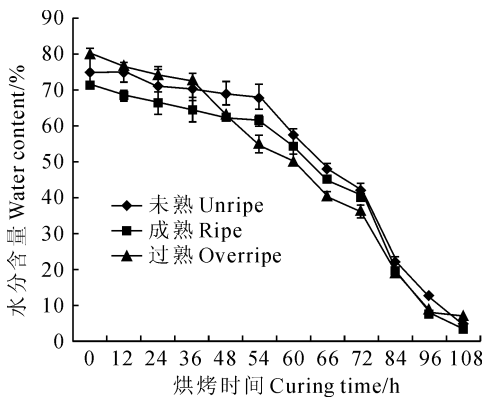


图 1 烘烤过程中不同成熟度烟叶水分含量变化
Fig.1 Changes of water content in leaves of different maturities during curing

2 结果与分析

2.1 烘烤过程中不同成熟度烟叶的水分含量变化

如图 1 所示,3 个处理烟叶水分含量在烘烤过程中整体均呈逐渐下降趋势,且在前 48 h 下降较为平缓,48 h 后烟叶开始大量失水,水分含量迅速大幅降低;同时,过熟烟叶失水速率较快,成熟烟叶和未熟烟叶失水速率较慢。

其中,在烘烤 48~66 h 区间,过熟烟叶的水分含量始终低于成熟和未熟烟叶,未熟烟叶水分含量略高于成熟烟叶。各处理烟叶水分含量在不同烘烤时间点(48、54、60、66 h)上比较发现,过熟烟叶水分含量在 4 个时间点上的差异均达显著水平,而未熟烟叶、成熟烟叶仅在 54、60、66 h 3 个时间点上的差异达到显著水平,说明过熟烟叶在烘烤第 48 h 时就开始大量失水,而未熟、成熟烟叶在第 54 h 时才开始大量失水。进一步比较处理间烟叶水分含量发

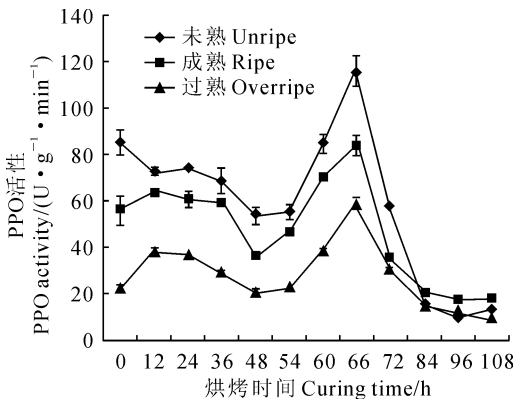


图 2 烘烤过程中不同成熟度烟叶 PPO 活性变化
Fig.2 Changes of PPO activity in leaves of different maturities during curing

表 2 不同成熟度烟叶含水量和 PPO 活性在烘烤 48~66 h 变化

Table 2 The water content and PPO activity of different harvesting maturities within 48—66 h during curing

指标 Index	处理 Treatment	烘烤时间 Curing time/h			
		48	54	60	66
烟叶含水量 Water content	未熟 Unripe	0.689±0.030 a(a)	0.679±0.035 a(a)	0.568±0.017 a(b)	0.472±0.017 a(c)
	成熟 Ripe	0.626±0.015 b(a)	0.615±0.015 b(a)	0.544±0.019 a(b)	0.454±0.008 a(c)
	过熟 Overripe	0.629±0.010 b(a)	0.551±0.023 c(b)	0.505±0.016 b(c)	0.402±0.015 b(d)
PPO 活性 PPO activity	未熟 Unripe	53.8±3.6 a(a)	55.2±3.2 a(a)	84.8±4.1 a(b)	116.0±6.6 a(c)
	成熟 Ripe	35.2±1.7 b(a)	46.4±0.9 b(b)	70.4±2.6 b(c)	84.0±4.4 b(d)
	过熟 Overripe	20.4±1.5 c(a)	22.4±0.6 c(a)	38.4±0.7 c(b)	58.8±2.4 c(c)

注:表中数据为均值±标准差,不同小写字母表示 0.05 水平差异显著,括号外字母表示同一指标同一时间点 3 个处理间的差异,括号内字母表示同一指标同一处理不同时间点之间的差异。表 3 同。

Note: Data show as means±SD of three replicates; The different normal letters mean significant at 0.05 levels, letters outside the parentheses mean the difference of the same indicator at the same curing time point but in the different processing, letters in the parentheses mean the difference of the same indicator in the same processing, but at the different curing time point. The same as Table 3.

现,烘烤第 66 h 时过熟烟叶与未熟、成熟烟叶水分含量差异显著,未熟烟叶和成熟烟叶水分含量差异不显著,这表明在烘烤第 66 h 时过熟烟叶的水分含量明显低于未熟、成熟烟叶,未熟和成熟烟叶水分含量分别高于过熟烟叶 5.2%、7.0%(表 2)。

2.2 烘烤过程中不同成熟度烟叶 PPO 活性变化

烘烤过程中 3 个处理烟叶 PPO 活性整体呈现先缓慢下降,再迅速上升,最后迅速下降并维持在较低水平的趋势(图 2)。整个烘烤过程中 PPO 活性始终为未熟烟叶>成熟烟叶>过熟烟叶。

其中,在烘烤 48~66 h 区间,过熟烟叶的 PPO 活性始终维持在较低水平,成熟烟叶和未熟烟叶明显高于过熟烟叶。成熟烟叶 PPO 活性在 4 个时间点(48、54、60、66 h)上的差异均显著,未熟、过熟烟叶仅在 54、60、66 h 3 个时间点上差异显著,这表明成熟烟叶 PPO 活性在烘烤第 48 h 时就开始明显升高,而未熟、过熟烟叶在第 54 h 时才开始明显升高。同时,3 个处理间烟叶 PPO 活性在不同烘烤时间(48、54、60、66 h)点上差异均显著,说明在 4 个时间点上,未熟烟叶的 PPO 活性明显高于成熟烟叶,高于过熟烟叶。在 66 h 时间点上,未熟和成熟烟叶 PPO

活性分别高于过熟烟叶 97.3%、42.9%(表 2)。

2.3 烘烤过程中不同成熟度烟叶的多酚类物质含量变化

2.3.1 总酚含量

烟叶烘烤过程中 3 个处理总酚含量变化趋势相似,即随着烘烤时间的延续,总酚含量在 0~48 h 缓慢上升,之后缓慢下降至 72 h 时达最低值,72 h 后急剧上升至烘烤结束;在整个烘烤过程中,总酚含量始终表现为成熟烟叶>过熟烟叶>未熟烟叶,烘烤结束时过熟烟叶总酚含量与成熟烟叶相当,略低于成熟烟叶(图 3, A)。

其中,在烘烤 48~66 h 区间,烟叶总酚含量下降速度表现为未熟烟叶>成熟烟叶>过熟烟叶。烟叶总酚含量在不同烘烤时间(48、54、60、66 h)点上比较发现(表 3),3 个处理均在 60 和 66 h 2 个时间点上差异显著,在 48、54 和 60 h 3 个时间点上差异不显著,表明第 66 h 时 3 个处理的烟叶总酚含量均有明显升高;烟叶总酚积累速度在不同烘烤时间(48、54、60、66 h)点上比较发现,3 个处理在 4 个时间点上差异均显著,说明随着烘烤过程的进展,3 个处理烟叶总酚积累速度均明显降低。

处理间烟叶总酚含量比较发现,3 个处理在不

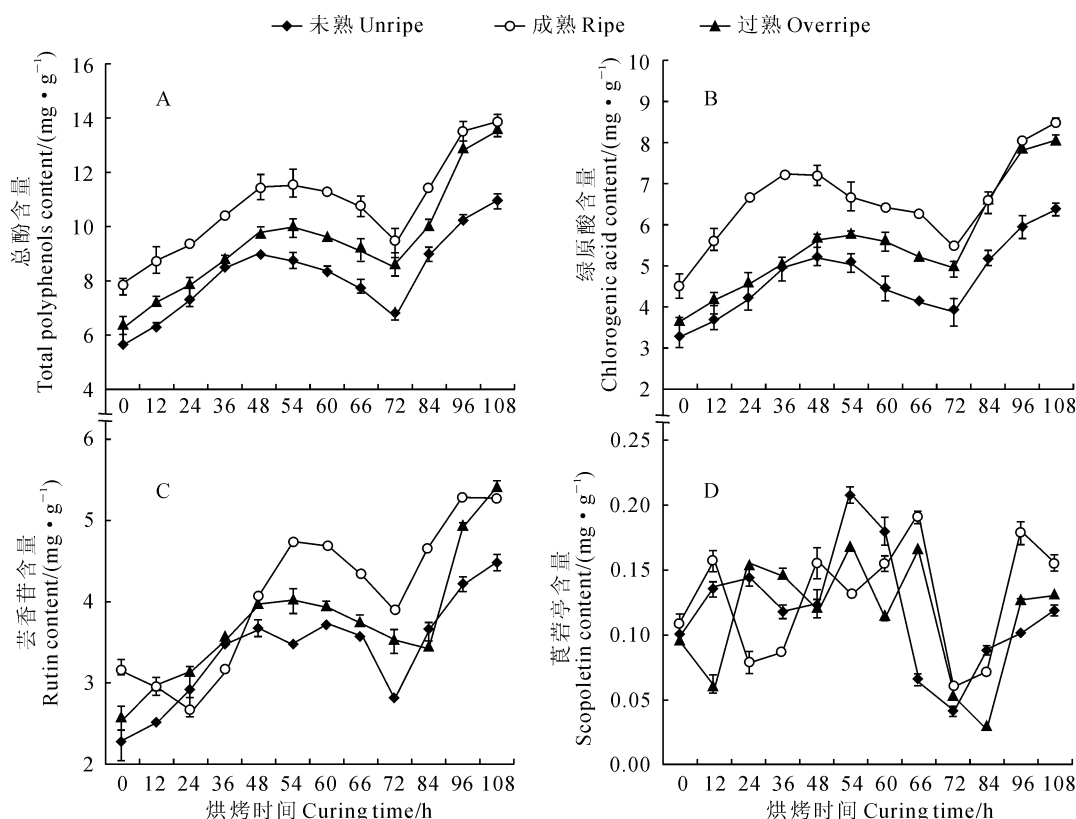


图 3 烘烤过程中不同成熟度烟叶总酚、绿原酸、芸香苷和茛菪亭含量变化

Fig. 3 Changes of total polyphenols, chlorogenic acid, rutin and scopoletin contents in leaves of different maturities during curing

同烘烤时间(48、54、60、66 h)点上差异均显著,说明在 4 个烘烤时间点,成熟烟叶总酚含量明显高于过熟烟叶,高于未熟烟叶;处理间总酚积累速度比较发现,48、54、60 h 3 个时间点上未熟烟叶与过熟、成熟烟叶差异显著,而过熟烟叶和成熟烟叶之间差异不显著,66 h 时间点上 3 个处理之间差异显著,这表明在 66 h 时间点之前未熟烟叶多酚积累速度明显低于成熟、过熟烟叶,在 66 h 时间点上,过熟烟叶多酚积累速度明显高于未熟和成熟烟叶,分别高出 73.8%、116.4%(表 3)。

2.3.2 绿原酸含量 烟叶在烘烤过程中绿原酸含量变化与总酚含量变化相似。整个烘烤过程中绿原酸含量始终为成熟烟叶>过熟烟叶>未熟烟叶,只是在 84 h 之后过熟烟叶迅速上升,烘烤结束后绿原酸基本与成熟烟叶相当,略低于成熟烟叶(图 3,B)。

如表 2 所示,烟叶绿原酸含量在不同烘烤时间(48、54、60、66 h)点上比较发现,未熟烟叶在 54、60、66 h 3 个时间点上差异显著,成熟烟叶在 48、54、66 h 3 个时间点上差异显著,在 54、60 h 2 个时间点上差异不显著,过熟烟叶在 60、66 h 2 个时间点上差异显著,这说明在 60~66 h 区间,3 个处理烟叶绿原酸含量均有明显降低,而 60 h 之前仅有未熟、成熟烟叶绿原酸含量有明显降低。处理间烟叶绿原酸含量比较发现,3 个处理在 4 个烘烤时间点上差异均显著,表明在 4 个烘烤时间点上成熟烟叶绿原酸含量明显高于过熟烟叶,未熟烟叶绿原酸含量最低,其中,在 66 h 时间点上,成熟烟叶绿原酸含

量分别高出过熟烟叶和成熟烟叶 19.3%、51.8%。

2.3.3 芸香苷含量 烘烤过程未熟烟叶、过熟烟叶芸香苷含量变化与绿原酸相似,呈缓慢上升趋势,至 48 h 达到高峰,成熟烟叶先降后升最低点出现在 24 h,最高点出现在 54 h;随后 3 个处理芸香苷含量均下降,未熟烟叶、成熟烟叶下降速度较快,过熟烟叶下降较为缓慢,未熟烟叶、成熟烟叶芸香苷含量最低点出现在 72 h,过熟烟叶最低点出现在 84 h;最后 3 个处理均快速上升直至烘烤结束(图 3,C)。烤前烟叶芸香苷含量为:成熟烟叶>过熟烟叶>未熟烟叶,烤后烟叶为过熟烟叶>成熟烟叶>未熟烟叶。

2.3.4 苣荬亭含量 如图 3,D 所示,烘烤开始时 3 个处理烟叶苣荬亭含量均呈波动上升趋势,变化幅度较大,其中未熟烟叶 54 h 达到峰值,成熟烟叶和过熟烟叶 66 h 达到峰值;随后 3 个处理均呈快速下降趋势,未熟烟叶、成熟烟叶 72 h 达到最低点,过熟烟叶 84 h 达到最低点;之后 3 个处理均快速上升最后趋于稳定。烤后烟叶苣荬亭含量相对烤前烟叶略有提高,其中成熟烟叶提升幅度最大,过熟烟叶与未熟烟叶相当,略高于未熟烟叶。

2.4 烘烤过程中酶促棕色化反应相关指标的相关性分析

对烘烤过程中 48~66 h 区间烟叶的 PPO 活性、多酚类物质含量和总酚积累速度分别做了相关性分析,结果如表 4 所示。其中,在烘烤过程中 48~66 h 区间,未熟、过熟烟叶的总酚含量与 PPO 活性变化呈极显著负相关,表明烟叶较高或者较低的

表 3 不同成熟度烟叶多酚类物质含量在烘烤 48~66 h 间的变化
Table 3 The polyphenols content of different harvesting maturities within 48~66 h during curing

指标 Index	处理 Treatment	烘烤时间 Curing time/h			
		48	54	60	66
总酚含量 Total polyphenols content/(mg·g ⁻¹)	未熟 Unripe	9.03±0.17 a(a)	8.75±0.27 a(a)	8.37±0.19 a(a)	7.77±0.26 a(b)
	成熟 Ripe	11.43±0.48 b(a)	11.54±0.53 b(a)	11.25±0.34 b(a)	10.76±0.41 b(b)
	过熟 Overripe	9.77±0.21 c(a)	9.94±0.36 c(a)	9.64±0.23 c(a)	9.14±0.39 c(b)
总酚积累速度 Accumulation speed of total polyphenols /(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	未熟 Unripe	-0.28±0.03 a(a)	-0.39±0.04 a(b)	-0.59±0.03 a(c)	-1.06±0.08 a(d)
	成熟 Ripe	0.12±0.01 b(a)	-0.29±0.04 b(b)	-0.49±0.01 b(c)	-1.32±0.1 b(d)
	过熟 Overripe	0.18±0.014 b(a)	-0.30±0.03 b(b)	-0.51±0.01 b(c)	-0.61±0.07 c(d)
绿原酸含量 Chlorogenic acid content/(mg·g ⁻¹)	未熟 Unripe	5.24±0.21 a(a)	5.08±0.23 a(a)	4.46±0.31 a(b)	4.11±0.11 a(c)
	成熟 Ripe	7.21±0.22 b(a)	6.69±0.35 b(b)	6.41±0.08 b(b)	6.24±0.16 b(c)
	过熟 Overripe	5.67±0.13 c(a)	5.77±0.09 c(a)	5.59±0.23 c(a)	5.23±0.07 c(b)
芸香苷含量 Rutin content /(mg·g ⁻¹)	未熟 Unripe	3.67±0.11 a(a)	3.47±0.07 a(b)	3.73±0.04 a(a)	3.60±0.09 a(a)
	成熟 Ripe	4.06±0.04 b(a)	4.72±0.07 b(b)	4.69±0.07 b(b)	4.33±0.09 b(c)
	过熟 Overripe	3.98±0.08 b(a)	4.01±0.16 c(a)	3.94±0.09 c(a)	3.73±0.13 a(b)
苣荬亭含量 Scopoletin content /(mg·g ⁻¹)	未熟 Unripe	0.12±0.01 a(a)	0.21±0.01 a(b)	0.18±0.01 a(c)	0.07±0.01 a(d)
	成熟 Ripe	0.16±0.01 b(a)	0.13±0.00 b(b)	0.15±0.01 b(a)	0.19±0.01 b(c)
	过熟 Overripe	0.12±0.01 a(a)	0.17±0.00 c(b)	0.11±0.00 c(a)	0.17±0.00 c(b)

表 4 不同采收成熟度处理酶促棕色化反应指标的相关系数

Table 4 The correlation index of related metrics in enzymatic browning reaction in different treatments of harvesting maturities

相关系数 Correlation coefficient	处理 Treatment	总酚含量 Total polyphenols content	总酚积累速度 Accumulation speed of total polyphenols	绿原酸含量 Chlorogenic acid content	芸香苷含量 Rutin content	莨菪亭含量 Scopoletin content
PPO 活性 PPO activity	未熟 Unripe	-0.890 **	-0.736 **	-0.890 **	0.222	-0.588
	成熟 Ripe	-0.512	-0.603 *	-0.855 **	0.268	0.575
	过熟 Overripe	-0.746 **	-0.496	-0.810 **	-0.398	0.308
总酚含量 Total polyphenols content	未熟 Unripe	—	0.989 **	0.986 **	-0.556	0.521
	成熟 Ripe	—	0.918 **	0.910 **	0.206	-0.907 **
	过熟 Overripe	—	0.556	0.988 **	0.989 **	-0.254
总酚积累速度 Accumulation speed of total polyphenols	未熟 Unripe	—	—	0.950 **	-0.050	0.633 *
	成熟 Ripe	—	—	0.893 **	-0.144	-0.684 *
	过熟 Overripe	—	—	0.611 *	0.623 *	-0.376
绿原酸含量 Chlorogenic acid content	未熟 Unripe	—	—	—	-0.250	0.475
	成熟 Ripe	—	—	—	-0.539	-0.353
	过熟 Overripe	—	—	—	0.995 **	-0.299
芸香苷含量 Rutin content	未熟 Unripe	—	—	—	—	-0.270
	成熟 Ripe	—	—	—	—	-0.505
	过熟 Overripe	—	—	—	—	-0.391

注: * 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。

Note: * and ** indicate significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

PPO 活性对多酚物质含量影响较为明显;3 个采收成熟度处理的烟叶 PPO 活性与总酚积累速度变化呈负相关,未熟烟叶达到了极显著水平,成熟烟叶达到了显著水平,这表明烟叶较高的 PPO 活性对总酚积累速度产生了显著影响;PPO 活性与绿原酸含量变化均呈极显著负相关,说明烟叶 PPO 活性与绿原酸含量变化紧密相关,PPO 主要通过影响绿原酸的积累而影响总酚含量变化;总酚含量与绿原酸含量变化均呈极显著正相关,可见烟叶总酚含量与绿原酸含量的变化一致,绿原酸含量变化一定程度上主导总酚含量的变化。

3 讨 论

烟叶成熟度对烟叶烘烤过程中变黄期水分含量有重要影响^[7-8]。这与不同成熟度烟叶组织结构疏松致密程度紧密相关^[18-20],随着烟叶采收成熟度的提高,烟叶组织结构逐渐疏松,保水能力变弱,失水速度加快^[7]。研究表明:烘烤过程中变黄末期至定色前期,随着烟叶成熟度的提高,烟叶失水速率加快,含水量逐渐降低;过熟烟叶大量失水时间相对较早,而成熟、未熟烟叶大量失水时间相对滞后。

烟叶水分是烟叶烘烤过程中 PPO 活性的重要限制因素^[10],烘烤过程中 PPO 活性的变化呈现先缓慢降低,后急速上升,最后急剧下降的趋势,这与

王传义^[8],兰俊荣等^[21]的研究结果基本一致。水分含量高的烟叶 PPO 活性在变黄末期定色初期有一个明显的高峰^[21]。研究表明:变黄末期至定色前期各个时间点,随着烟叶水分含量的增加,烟叶 PPO 活性逐渐增高;而烟叶采收成熟度越高,烟叶水分含量越低,可见提高烟叶采收成熟度,能够有效降低烘烤过程中烟叶 PPO 活性。在变黄末期和定色前期阶段,成熟烟叶 PPO 活性相较于未熟、过熟烟叶的提前升高,可能是由于成熟烟叶细胞裂解较快,细胞完整性被破坏,PPO 所处环境水分含量升高导致的,而未熟烟叶细胞裂解相对滞后,过熟烟叶细胞在此阶段之前已经充分裂解并大量失水^[7,10,21]。烤后烟叶(未熟、成熟、过熟)的挂灰率分别为 22.6%,18.0%,10.4%(以每百竿烤后挂灰烟叶数量占烤后烟叶数量比例计算挂灰率),未熟烟叶的烤后烟叶挂灰率明显高于成熟烟叶,高于过熟烟叶,表明烘烤过程中过高 PPO 活性将导致烤后烟叶挂灰率的增加。

在烟草中,酚类物质大部分呈多酚状态存在,而且多酚是以葡萄糖苷和酯的形式存在^[6]。烘烤过程中多酚类物质的变化主要是由于酚糖苷的热解作用和酶促分解,多酚氧化酶催化的酶促棕色化反应对多酚类物质积累有重要影响^[2,6,22]。多酚物质在烘烤过程中呈现先升高后降低,再升高的变化趋势;这与宫长荣等^[12]的研究结果相似。研究表明:在

48~66 h 区间,烟叶 PPO 活性与多酚物质积累速度呈负相关,未熟烟叶达到了极显著水平;成熟烟叶达到了显著水平;过熟烟叶没有达到显著相关水平;不同采收成熟度烟叶的 PPO 活性与绿原酸含量变化均呈极显著负相关。这说明在烘烤过程中,烟叶过高的 PPO 活性降低了多酚物质积累,而较低的 PPO 活性对多酚物质的积累影响较小,PPO 主要通过影响绿原酸的积累影响总酚含量变化^[23]。绿原酸是总酚的主要成分,是改善烟叶等级最主要的多酚类物质^[24],烘烤过程中烟叶叶尖变褐最早可能与绿原酸含量高有直接关系^[25]。绿原酸的变化规律与多酚相似,其与总酚含量变化的相关性,3 个处理均达到了极显著正相关水平。说明绿原酸在多酚类物质变化中起着主导作用,其与酶促棕色化反应的关系也最为密切^[12]。芸香苷,茛菪亭含量变化与总酚含量变化没有显著相关性。芸香苷和茛菪亭含量变化的不规律性说明 PPO 对多酚物质含量的影响也取决于对各组分影响的加成效应,有待于进一步研究^[5,11-12]。

由以上研究结果可知,在烘烤过程中,以过熟采收烟叶的水分含量最低,PPO 活性最低,成熟采收烟叶次之,未熟采收烟叶最高;过熟烟叶多酚含量与成熟烟叶相当,略低于成熟烟叶,未熟烟叶最低。这与过熟烟叶组织结构疏松、变黄中后期失水速度较快,多酚氧化酶活性始终维持在相对较低水平,多酚类物质的氧化还原反应未被破坏,酚类物质不会被大量氧化成醌而减少,不易发生棕色化反应有关。在整个烘烤过程中,不同成熟度烟叶水分含量的高低,导致多酚氧化酶活性表现有很大差异,多酚类物质积累规律也不同。因此,在常规三段式烘烤工艺下,适当提高烟叶田间采收成熟度,能够有效地促进烟叶失水,降低烘烤过程中(尤其是酶促棕色化反应敏感期)的 PPO 活性,使烟叶含水量在 66 h 时保持在 40% 以下,PPO 活性在 $58.8 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 以下。通过降低烟叶水分含量和抑制 PPO 活性,有利于防止烟叶发生褐变,有效地减少烤后烟叶挂灰率,从而提高烤后烟叶的外观及内在品质。

参考文献:

- [1] LEI D F(雷东锋),FENG Y(冯 怡),MEI J SH(梅建生),*et al.* Characterization and prospect of application of polyphenol oxidase in tobacco plants[J]. *Chinese Tobacco Science* (中国烟草科学),2003,**24**(2):1-4(in Chinese).
- [2] PENG X H(彭新辉),ZHOU Q M(周清明),YI J H(易建华),*et al.* Advances in research on polyphenol oxidase in tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology* (烟草科技),2006(12):6-10(in Chinese).
- [3] KALLIANOS A G. Phenolics and acids in leaf and their relationship to smoking quality and aroma[J]. *Recent Adv. Tobacco Sci.*,1976,(2):61-79.
- [4] 左天觉. 烟草的生产、生理和生物化学[M]. 上海:上海远东出版社,1993:220-225.
- [5] XU X Y(徐晓燕),SUN W S(孙五三),WANG N R(王能如). Synthesis of polyphenolic compounds and their effects on tobacco quality[J]. *Chinese Tobacco Science* (中国烟草科学),2003,**24**(1):3-5(in Chinese).
- [6] BATE-SMITH E C. The commoner phenolic constituents of plants and their systematic distribution[J]. *Journal of Royal Dublin Society of Proceeding Science*,1956,(27):75-165.
- [7] LONG X(龙 翔),YANG H Q(杨虹琦),*et al.* Analysis on chromoplast pigments contents in tobacco leaves of different varieties and maturities during curing[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University* (云南农业大学学报),2010,**25**(3):364-368(in Chinese).
- [8] WANG CH Y(王传义),SUN F SH(孙福山),*et al.* Studies on physiological and biochemical changes in tobacco leaves of different maturity during flue-curing[J]. *Chinese Tobacco Science* (中国烟草科学),2009,**30**(3):49-53(in Chinese).
- [9] LEI D F(雷东锋),JIANG D Z(蒋大宗),WANG Y L(王一理). Physiological and biochemical characteristic of tobacco polyphenol oxidase and control way for its activity[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报),2003,**37**(12):1 316-1 320(in Chinese).
- [10] 宫长荣. 烟草调制学[M]. 北京:中国农业出版社,2003:125-136.
- [11] WANG S F(王松峰),WANG A H(王爱华),WANG X W(王先伟),*et al.* Effects of different bulk curing technologies on polyphenol content and PPO activity in tobacco leaves[J]. *Acta Tabacaria Sinica* (中国烟草学报),2013,(5):58-60(in Chinese).
- [12] GONG CH R(宫长荣),WANG A H(王爱华),WANG S F(王松峰). Changes of polyphenols in tobacco leaves during the flue-curing process and relative analysis of some chemical components[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学),2005,**38**(11):2 316-2 320(in Chinese).

- [13] WANG A H(王爱华), WANG S F(王松峰), GONG CH R(宫长荣). The dynamic effects of nitrogen rate on polyphenols of flue-cured tobacco upper leaf[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*(Nat. Sci. Edi.)(西北农林科技大学学报·自然科学版), 2005, **33**(3): 57—60(in Chinese).
- [14] 朱广廉, 钟文海, 张爱琴. 植物生理学实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991: 55—58.
- [15] YC/T 202-2006 烟草及烟草制品多酚类化合物绿原酸、茛菪亭和芸香苷的测定[S]. 北京: 国家烟草专卖局发现, 2006.
- [16] 王瑞新. 烟草化学品质分析法[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1998: 42—44.
- [17] 白宝璋. 植物生理学测试技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 32—35.
- [18] LI Y W(李跃武), CHEN CH Y(陈朝阳), JIANG H(江 豪), *et al.* Studies on leaf maturity of Yunyan 85, a variety of flue-cured tobacco I. Relationship between the maturity and the tissue, color and chemical compositions in leaves[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*(Nat. Sci. Edi.)(福建农林大学学报·自然科学版), 2002, **31**(1): 16—21(in Chinese).
- [19] ZHANG SH T(张树堂), YANG X B(杨雪彪), *et al.* Comparison of tissue of fresh flue-cured tobacco leaves with different maturity[J]. *Tobacco Science & Technology*(烟草科技), 2005, (1): 38—40(in Chinese).
- [20] XIA K(夏 凯), QI SH W(齐绍武), ZHOU J H(周冀衡), *et al.* Relationship of maturing degree with tissue structure and chlorophyll content in flue-cured tobacco leaves[J]. *Crop Research*(作物研究), 2005, **19**(2): 102—105(in Chinese).
- [21] LAN J R(兰俊荣), JING J L(靖军领), *et al.* Changes of polyphenol oxidase activity in different maturity tobacco during flue-curing process[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*(现代农业科技), 2010, (23): 54—57(in Chinese).
- [22] 王瑞新. 烟草化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 145—154.
- [23] LEI D F(雷东锋), FENG Y(冯 怡), MEI J SH(梅建生), *et al.* Characterization of polyphenol oxidase in tobacco leaves[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(1): 161—166(in Chinese).
- [24] ZUCKER M, AHRENS J F. Quantitative assay of chlorogenic acid and its pattern of distribution with tobacco leaves[J]. *Plant Physiol.*, 1958, (33): 246—249.
- [25] AI F Q(艾复清), LIU K(刘 垦). Recent advances in research on chlorogenic acid in tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*(中国烟草科学), 2008, **29**(4): 46—50(in Chinese).

封面植物介绍——裸茎碎米荠

裸茎碎米荠(*Cardamine scaposa* Franch.) 隶属于十字花科(Brassicaceae)碎米荠属。多年生草本, 高 4~18 cm, 花葶状, 全株无毛。根状茎纤细, 匍匐生长。茎单一直立, 无叶。基生叶单一; 叶柄长 1~12 cm; 叶近于圆形或肾状圆形, 长 0.3~2.0 cm, 宽 0.5~3.0 cm, 基部心形, 边缘波状或全缘。无茎生叶。总状花序顶生, 具 2~10 朵花。果期花梗直立或上升, 长 1~4 cm, 基部的最长。萼片卵圆形或椭圆形, 长 3~4 mm, 宽 1.5~2.2 mm, 边缘膜质, 白色透明。花瓣白色, 倒卵形, 长 8~13 mm, 宽 5~7 mm, 顶端圆或微凹, 基部渐狭呈短爪。中间一对花丝长 4.5~8.0 mm, 基部略扩大; 外侧一对花丝长 2.5~4.5 mm; 花药狭长卵形, 长 1.5~1.8 mm; 花柱长 3.0~7.5 mm。每室具胚珠 8~14 个。长角果长 2.0~3.5 cm, 宽 1.2~1.7 mm; 光滑无毛。种子淡褐色, 长圆形, 长 2~3 mm, 宽 1.0~1.5 mm, 无翅。花期 4~6 月, 果期 6~7 月。

裸茎碎米荠是中国特有一种药用植物, 生长在海拔 1 400~2 900 m 的灌木丛和潮湿地带。分布于河北、内蒙古、陕西、山西和四川。

(图文由西北农林科技大学资环学院朱仁斌提供)