

烤烟变黄期叶绿素降解动力学分析

魏 硕¹, 王 涛², 王松峰³, 高华锋², 解 燕², 毛建书²,
李祖红², 张 峰², 宋朝鹏^{1*}

(1.河南农业大学烟草学院, 郑州 450002; 2.云南省烟草公司曲靖市公司, 云南 曲靖 655000; 3.中国农业科学院烟草研究所, 农业部烟草生物学与加工重点实验室, 青岛 266101)

摘 要:为研究不同烤烟品种的变黄特性和预测变黄期烟叶叶绿素含量变化,通过分析不同品种(红花大金元、K326和云烟85)在不同变黄温度(34℃、36℃、38℃、40℃和42℃)下烟叶叶绿素含量变化,建立了烟叶叶绿素降解动力学模型。试验结果表明:(1)随着变黄温度的升高烟叶叶绿素降解加快,变黄温度较低时(34℃、36℃)烟叶叶绿素降解存在延滞期,高温变黄(40℃、42℃)不存在延滞期;相同变黄温度下,云烟85烟叶叶绿素降解最快,K326次之,红花大金元最慢。(2)利用一阶反应模型可以很好地描述变黄期烟叶叶绿素含量变化,随着变黄温度升高烟叶叶绿素降解半衰期 $t_{1/2}$ 缩短,红花大金元、K326和云烟85烟叶叶绿素降解活化能分别为61.76、56.20和53.16 kJ/mol;(3)试验建立了基于温度波动变化的叶绿素降解反应模型,为预测实际变黄过程中烟叶叶绿素含量变化提供理论参考。

关键词:烤烟;变黄期;叶绿素;降解动力学;模型

中图分类号:TS44+1

文章编号:1007-5119(2017)04-0086-06

DOI:10.13496/j.issn.1007-5119.2017.04.014

Analysis of the Chlorophyll Degradation Kinetics of Flue-cured Tobacco during the Yellowing Stage

WEI Shuo¹, WANG Tao², WANG Songfeng³, GAO Huafeng², XIE Yan²,
MAO Jianshu², LI Zuhong², ZHANG Feng², SONG Zhaopeng^{1*}

(1. College of Tobacco Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Yunnan Qujing Municipal Tobacco Company, Qujing, Yunan 655000, China; 3. Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture, Tobacco Research Institute of CAAS, Qingdao 266101, China)

Abstract: In order to study the yellowing characteristics of different tobacco varieties and predict the changes of chlorophyll content during the yellowing stage. Changes of flue-cured tobacco leaves' chlorophyll content in different varieties (Honghuadajinyuan, K326, Yunyan85) under different yellowing temperature (34℃, 36℃, 38℃, 40℃ and 42℃) were analyzed, and the degradation kinetic model of flue-cured tobacco leaves' chlorophyll was established. The results showed that flue-cured tobacco leaves' chlorophyll content got a faster degradation with the increase of yellowing temperature. There was a lag phase of flue-cured tobacco leaves' chlorophyll degradation at the low yellowing temperature (such as 34℃ and 36℃), however, there was no lag phase at the high yellowing temperature (such as 40℃ and 42℃). The chlorophyll degradation of the Yunyan-85 variety was the fastest, followed by the variety of K326, and the variety of Honghuadajinyuan got the slowest degradation. The first-order reaction kinetic model can well describe the variation of flue-cured tobacco leaves' chlorophyll content during the yellowing stage. The half-life($t_{1/2}$) of flue-cured tobacco leaves' chlorophyll degradation was shortened with yellowing temperature increased. The chlorophyll degradation activation energy of the varieties of Honghuadajinyuan, K326 and Yunyan85 leaf were 61.76, 56.20 and 53.16 kJ/mol respectively. The chlorophyll degradation reaction model based on the variation of temperature fluctuation was established in the test, which could provide a theoretical reference for the accurate prediction of the changes of chlorophyll content in tobacco leaves during the yellowing stage.

Keywords: flue-cured tobacco; yellowing stage; chlorophyll; degradation kinetics; model

基金项目:中国烟草总公司云南省公司项目“防治烘烤过程中烟叶腐烂霉变技术研究推广”(2016YN10)

作者简介:魏 硕(1991-),男,在读硕士,研究方向为烟叶烘烤研究。E-mail:weishuo006@163.com。*通信作者,E-mail:ycszp@163.com

收稿日期:2017-04-18

修回日期:2017-06-26

变黄是烟叶烘烤过程的主要任务之一,烟叶变黄主要与叶绿素的降解有关^[1]。通常烘烤过程中烟叶叶绿素不断被降解、含量逐渐减少,类胡萝卜素虽然也发生降解,但其降解较慢、降解量小,致使类胡萝卜素等黄色素比例增加,烟叶逐渐呈现黄色^[1-2]。叶绿素含量也是衡量烤后烟叶品质的主要指标^[3-4],叶绿素含量较高时,烤后烟叶外观等级较差,评吸时青杂气明显。变黄期是烟叶色素降解的关键时期,烟叶有80%以上的叶绿素被降解^[1],因此研究变黄期烟叶叶绿素的降解特性具有重要意义。

近年来,零阶反应模型或一阶反应模型被广泛应用于研究绿色果蔬加工贮藏过程中叶绿素降解变化,预测产品的货架期^[5-7],取得了相应的研究进展;许凤等^[8]研究表明,利用一阶反应模型可以很好地预测青花菜贮藏过程叶绿素降解动力学;杨宏顺等^[9]研究显示,嫩茎花椰菜在不同气调包装下的叶绿素降解动力学符合一阶反应模型;乔勇进等^[10],谢晶等^[11]研究表明,采后上海青在不同贮藏温度条件下叶绿体色素降解变化符合零级动力学反应模型,并确定了其降解的活化能。目前,关于烘烤过程烟叶叶绿素降解反应模型的研究尚未见报道。

烟叶叶绿素的降解速率与烘烤环境温度有关,温度主要影响叶绿素酶活性,直接影响其降解速率^[1],适当提高烟叶变黄温度可以加快变黄^[1,12];湿度主要影响烟叶水分这一反应介质的含量,间接影响叶绿素降解速率^[1];烟叶叶绿素的降解速率还与品种有关^[13-14],如云烟85烟叶叶绿素降解较快,易烤性较好,红花大金元烟叶叶绿素降解较慢,易烤性较差;K326烟叶叶绿素降解速率介于两者之间,易烤性适中。为此,试验通过研究红花大金元、K326和云烟85烟叶在不同变黄温度下叶绿素降解动力学特性,为揭示烤烟品种之间变黄特性差异和预测烟叶叶绿素变化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2015年8月在云南省曲靖市师宗县彩云试验基地进行,供试品种为云烟85、K326和红

花大金元,试验田土壤肥力中等,株行距55 cm × 110 cm,按照当地优质烟叶生产技术规范统一管理,选取叶片大小相对一致的10~11叶位中部适熟烟叶采收,用福州兴东辉自动化科技有限公司生产的电热式智能烤烟箱烘烤。

1.2 方法

根据实际烘烤过程烤房温度、湿度范围,试验将变黄温度等间距划分为34℃、36℃、38℃、40℃和42℃,相对湿度均为85%,烟叶变黄过程每隔3h取1次样,每个取样节点3次重复,当烟叶达到黄片青筋时停止试验。

1.3 烟叶叶绿素含量的测定

将所取烟叶叶尖和叶基各剪去10 cm,并剔除烟叶的主脉和支脉,用烘箱105℃杀青烘干,研磨并过60目筛,取0.2 g样,利用80%的丙酮进行色素提取,提取液分别在分光光度计644 nm和662 nm下比色,进而测定其叶绿素的含量^[15]。

1.4 烟叶叶绿素降解动力学模型建立

1.4.1 零阶和一阶反应动力学模型 农产品在加工贮藏过程中品质指标变化受各种因素的影响,大量研究表明,农产品加工贮藏过程中品质变化符合零阶反应模型[式(1)]或一阶反应模型[式(2)]^[16-17]。

$$C_t = C_0 + k_0 t \quad (1)$$

$$C_t = C_0 + \exp(-k_1 t) \quad (2)$$

式中 C_0 、 C_t 分别为样品的初始品质指标值和 t 时的品质指标值; k_0 、 k_1 分别为零阶反应模型和一阶反应模型品质指标变化的速率常数; t 为反应持续时间, h。

1.4.2 反应的半衰期和活化能 当样品的品质指标下降至初始样品品质指标的一半时,所需的反应时间 $t_{1/2}$ 为半衰期^[17],式(3)为零阶反应的半衰期,式(4)为一阶反应的半衰期。

$$t_{1/2} = C_0 / 2k_0 \quad (3)$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / k_1 \quad (4)$$

Arrhenius方程可以用来描述反应模型速率常数随反应温度的变化关系^[11,17]。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

式中 A 为指前因子, E_a 为反应的活化能, J/mol ; R 为气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$; T 为反应的绝对温度, k 数值等于摄氏温度与 273.15 的加和。

1.5 数据分析

利用 Origin 2016 软件进行作图, 利用 MatlabR 2014a 软件进行数据分析。

2 结果

2.1 不同品种变黄期烟叶叶绿素降解动力学

不同变黄温度 ($34\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $36\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $42\text{ }^\circ\text{C}$) 下云烟 85、K326、红花大金元烟叶叶绿素含量随时间变化如图 1 所示, 随着时间的推移烟叶叶绿素含量逐渐降低, 随着变黄温度的升高烟叶叶绿素含量下降速度加快, 在变黄温度较低时 ($34\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $36\text{ }^\circ\text{C}$) 烟叶叶绿素降解速率呈先慢后快再慢的变化趋势, 而变黄温度较高时 ($40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $42\text{ }^\circ\text{C}$)

烟叶降解速率呈由快到慢的变化趋势, 说明低温变黄存在延滞期, 而高温变黄可以打破延滞期; 云烟 85 烟叶在 $42\text{ }^\circ\text{C}$ 变黄温度下变黄时间相比 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $36\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 分别减少 14.3%、20%、29.4% 和 42.9%, K326 烟叶在 $42\text{ }^\circ\text{C}$ 变黄温度下变黄时间相比 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $36\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 分别减少 13.3%、18.7%、35% 和 43.5%, 红花大金元烟叶在 $42\text{ }^\circ\text{C}$ 变黄温度下变黄时间相比 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $38\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $36\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $34\text{ }^\circ\text{C}$ 分别减少 11.8%、21.1%、31.8% 和 42.3%。

2.2 烟叶变黄期叶绿素降解模型构建

2.2.1 烟叶变黄期叶绿素降解模型确定 通常根据反应模型的拟合结果决定系数 R^2 推断反应阶数, 决定系数 R^2 越大, 说明反应符合此阶数; 不同温度条件下各品种烟叶变黄期叶绿素降解动力学模型求解结果见表 1, 在低温条件下 ($34\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $36\text{ }^\circ\text{C}$) 利用零阶反应模型可以获得较好的拟合效果, 但一

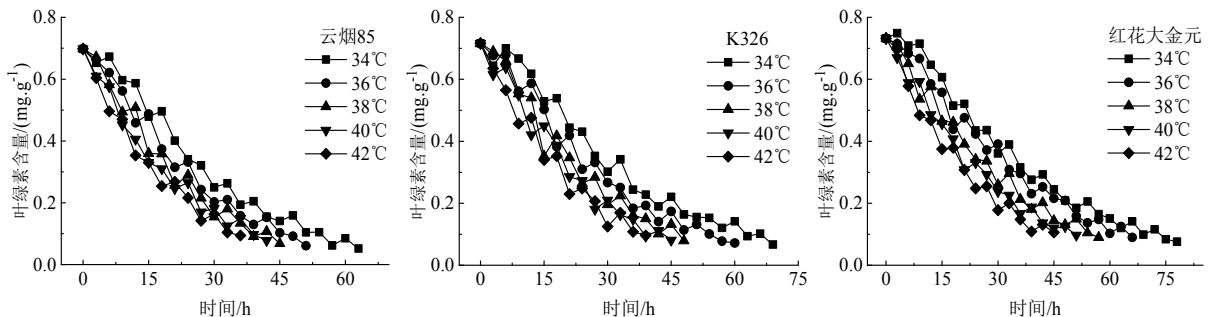


图 1 不同品种变黄期烟叶叶绿素含量变化

Fig. 1 Changes of chlorophyll content in tobacco leaves of different varieties during the yellowing stage

表 1 变黄期烟叶叶绿素降解动力学模型求解

Table 1 Results of tobacco leaves' chlorophyll degradation kinetics model during the yellowing stage

品种	变黄温度/ $^\circ\text{C}$	零阶反应模型		一阶反应模型	
		k_0	R^2	k_1	R^2
红花大金元	34	0.0096	0.9464	0.0230	0.9495
	36	0.0109	0.9523	0.0257	0.9649
	38	0.0129	0.9271	0.0315	0.9759
	40	0.0145	0.9109	0.0359	0.9846
	42	0.0165	0.8814	0.0419	0.9874
K326	34	0.0106	0.9347	0.0263	0.9472
	36	0.0125	0.9217	0.0320	0.9612
	38	0.0150	0.9249	0.0371	0.9555
	40	0.0163	0.9224	0.0413	0.0965
	42	0.0184	0.9061	0.0465	0.0977
云烟 85	34	0.0117	0.9401	0.0305	0.9499
	36	0.0141	0.9378	0.0365	0.9663
	38	0.0160	0.9241	0.0420	0.9672
	40	0.0172	0.8734	0.0468	0.9873
	42	0.0195	0.8801	0.0521	0.9879

阶反应模型模拟烟叶叶绿素含量变化决定系数 R^2 整体大于零阶反应模型,说明变黄期烟叶叶绿素含量变化符合一阶反应模型;速率常数 k_1 也显示随着变黄温度的升高烟叶叶绿素降解速率增大,相同变黄温度下,云烟 85 烟叶叶绿素降解速率最大, K326 次之,红花大金元最慢,这与烟叶叶绿素降解动力学曲线描述一致。

2.2.2 烟叶变黄期叶绿素降解模型验证 对烟叶变黄期叶绿素降解动力学一阶反应模型进行验证,

结果如图 2,变黄温度 38 °C 时,红花大金元、K326、云烟 85 烟叶叶绿素含量变化实测值与预测值决定系数 R^2 分别为 0.9853、0.9769、0.9854,说明一阶反应模型能够较为准确的反映各品种变黄过程叶绿素含量变化;K326 品种烟叶在变黄温度为 34 °C、38 °C 和 42 °C 条件下,叶绿素含量变化实测值与预测值决定系数 R^2 分别为 0.9823、0.9769、0.9864,说明一阶反应模型能够较为准确的反映不同温度条件下烟叶变黄过程叶绿素含量变化。

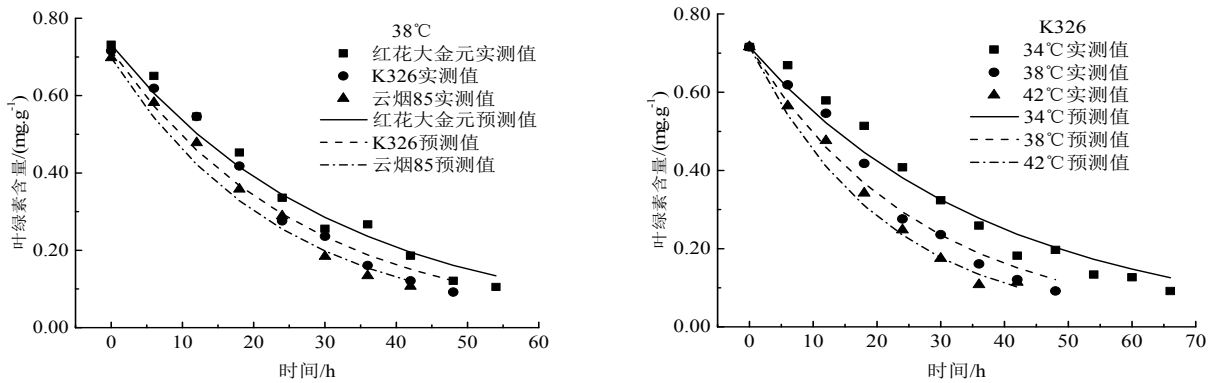


图 2 烟叶变黄期叶绿素降解动力学模型验证

Fig. 2 Verification of tobacco leaves' chlorophyll degradation kinetics model during the yellowing stage

2.2.3 烟叶变黄期叶绿素降解半衰期和活化能在模型构建基础上将烟叶叶绿素的一阶反应模型速率常数的对数 $\ln k$ 与变黄温度的倒数 $1000/T$ 进行线性拟合,结果见图 3,进而计算出烟叶变黄期叶绿素降解半衰期、指前因子和活化能(表 2),随着变黄温度升高烟叶叶绿素降解半衰期 $t_{1/2}$ 缩短,各品种 42 °C 时相比 34 °C 烟叶叶绿素降解的半衰期 $t_{1/2}$ 缩短 41.4%~45.2%,说明温度对烟叶叶绿素

的降解影响较大;活化能反映了单位反应需要从外界环境中吸收热量的多少,是反应动力学的重要参数,活化能越小反应越易进行,红花大金元烟叶叶绿素降解活化能为 61.76 kJ/mol,大于 K326 的 56.20 kJ/mol,云烟 85 烟叶叶绿素降解活化能最小,为

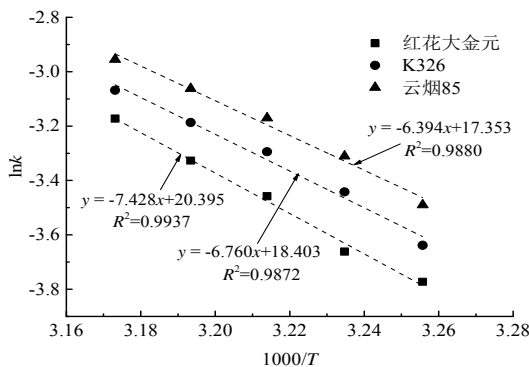


图 3 烟叶变黄期叶绿素降解的 Arrhenius 拟合

Fig. 3 Arrhenius fitting of chlorophyll degradation in tobacco leaves during the yellowing stage

表 2 烟叶变黄期叶绿素降解半衰期和活化能

Table 2 Half-time and active energy of chlorophyll degradation in tobacco leaves during the yellowing stage

品种	变黄温度/°C	半衰期 $t_{1/2}$ /h	指前因子 A	活化能 E_a /(kJ·mol ⁻¹)
红花大金元	34	30.1	7.202×10^8	61.76
	36	27.0		
	38	22.0		
	40	19.3		
	42	16.5		
K326	34	26.4	9.823×10^7	56.20
	36	21.7		
	38	18.7		
	40	16.8		
	42	14.9		
云烟 85	34	22.7	3.4382×10^7	53.16
	36	19.0		
	38	16.5		
	40	14.8		
	42	13.3		

53.16 kJ/mol，说明云烟 85 烟叶叶绿素降解较为容易，K326 次之，而红花大金元烟叶叶绿素降解相对较难，一定程度上揭示了不同品种变黄特性差异。

2.3 烟叶变黄期叶绿素降解动力学模型的应用

与试验的恒温变黄不同，实际烘烤过程变黄期烘烤温度变化为阶梯升温，并存在一定波动，为提升模型的可靠性和适用性，将实际烘烤变黄期温度波动变化融入模型；即在模型构建基础上，将一阶反应模型式(1)与 Arrhenius 方程式(5)结合，预测试验以 K326 品种中部叶为材料，代入 K326 品种烟叶活化能 E_a 和指前因子 A ，建立 K326 品种烟叶叶绿素含量 C_t 随时间 t 和变黄温度 D 的预测模型：

$$C_t = C_0 - 9.823 \times 10^7 t \exp\left(\frac{-56.203 \times 10^3}{8.314(D + 273.15)}\right)$$

根据国内现行烘烤技术，分别进行低温变黄烘烤(前期 33~34 °C、中期 36~37 °C、后期 39~40 °C)、中温变黄烘烤(前期 35~36 °C、中期 38~39 °C、后期 41~42 °C)和高温变黄烘烤(前期 37~38 °C、

中期 40~41 °C、后期 43~44 °C)烟叶叶绿素含量预测试验，其变黄期具体温度随时间变化曲线见图 4。通过代入烟叶叶绿素初始含量 C_0 ，并将变黄过程的时间 t 和对应温度 D 记录数值代入模型，烟叶叶绿素含量的实测值和预测值如图 5，基于温度波动的低温、中温、高温变黄条件下 K326 烟叶叶绿素含量变化实测值与预测值决定系数 R^2 分别为 0.9667、0.9765、0.9823，说明该反应模型能够较为准确的预测实际烘烤变黄过程中烟叶叶绿素含量变化。

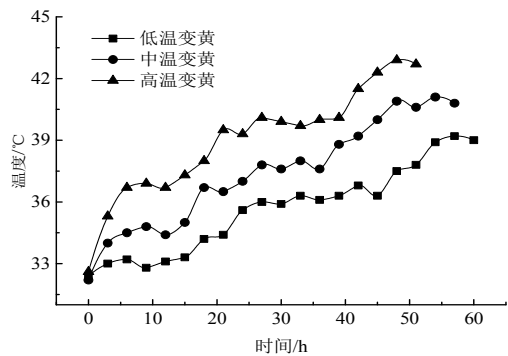


图 4 不同变黄条件烘烤过程温度变化
Fig. 4 Changes of temperature with different yellowing conditions during curing

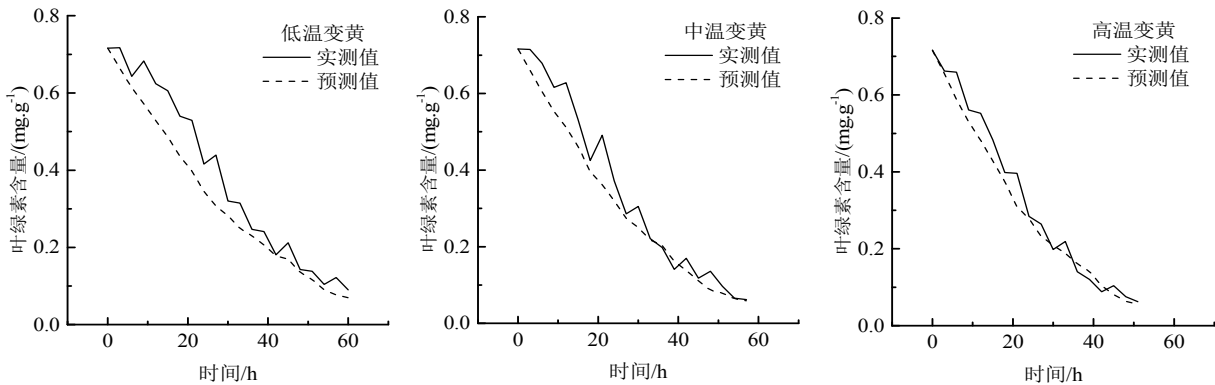


图 5 不同变黄条件烟叶叶绿素含量变化预测
Fig. 5 Prediction of chlorophyll content in tobacco leaves with different yellowing conditions

3 讨论

不同烤烟品种烘烤过程中烟叶色素降解速率存在一定差异^[3]，研究显示，相同变黄温度下，云烟 85 烟叶叶绿素降解最快，K326 次之，红花大金元最慢，这与张树堂等^[2]研究不同品种烟叶烘烤特性的结果一致。烟叶烘烤前期可以看作是烤房逆境

条件下内部物质代谢的过程，相关研究显示，随着变黄温度的升高烟叶叶绿素降解加快，这可能与高温逆境胁迫有关^[1]；从色素降解活化能来看，活化能反映了单位反应需要从外界环境中吸收热量的多少，有关研究认为活化能 $E_a < 42$ kJ/mol，反应速率较大， $E_a > 400$ kJ/mol，反应速率较小^[10]，烤烟

与小白菜贮藏过程叶绿素降解活化能 57.02 kJ/mol 较为接近^[11], 说明其叶绿素降解速率相对偏大、易发生降解; 高温条件下有利于烟叶吸收较多热量, 加速降解反应进行, 这印证了高温变黄烟叶叶绿素降解较快这一结论, 这可能是较低温度下叶绿素降解存在延滞期, 而较高温度下不存在延滞期的原因。

烘烤过程中不同变黄工艺条件下变黄前期预测结果与实际值偏差较大, 可能是变黄前期温度较低, 烟叶处于预热阶段^[18-19], 叶绿素降解开始启动、存在延滞期, 容易偏离实际值; 而且从叶绿素降解模型求解结果来看, 零阶模型随着变黄温度升高拟合优度基本呈下降趋势, 一阶模型随着变黄温度升高拟合优度基本呈升高趋势, 由此可推测, 随着变黄温度的降低烟叶色素降解可能匹配零阶模型, 这也可能是烘烤过程中变黄前期预测结果与实际值偏差较大的原因。

4 结 论

烤烟叶绿素降解动力学显示, 随着变黄温度的升高烟叶叶绿素含量下降速度加快; 相同温度下, 云烟 85 烟叶叶绿素降解最快, K326 次之, 红花大金元最慢; 烟叶变黄过程中叶绿素降解符合一阶反应模型, 随着变黄温度升高烟叶叶绿素降解半衰期 $t_{1/2}$ 缩短, 红花大金元烟叶叶绿素降解活化能较大, K326 次之, 云烟 85 烟叶叶绿素降解活化能最小; 试验建立了基于温度波动变化的叶绿素降解反应模型, 能够较为准确地预测实际烘烤变黄过程中烟叶叶绿素含量变化, 为进一步推动烟叶精准烘烤的发展提供参考。

参考文献

[1] 宫长荣. 烟草调制学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.

[2] 张树堂, 崔国民, 杨金辉. 不同烤烟品种的烘烤特性研究[J]. 中国烟草科学, 1997, 18(4): 37-41.

[3] 史宏志, 顾少龙, 段卫东, 等. 不同基因型烤烟质体色素降解及与烤后烟叶挥发性降解物含量关系[J]. 中国农业科学, 2012, 45(16): 3346-3356.

[4] 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.

[5] GIANNAKOUROU M C, TAOUKIS P S. Kinetic modelling of vitamin C loss in frozen green vegetables under variable storage conditions[J]. Food Chemistry, 2003, 83(1): 33-41.

[6] MASKAN M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. Journal of food engineering, 2001, 48(2): 169-175.

[7] NISHA P, SINGHAL R S, PANDIT A B. A study on the degradation kinetics of visual green colour in spinach (*Spinacea oleracea* L.) and the effect of salt therein[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(1): 135-142.

[8] 许凤, 杨震峰, 裴娇艳, 等. 基于颜色参数变化的青花菜叶绿素含量预测模型[J]. 食品科学, 2011, 32(13): 54-57.

[9] 杨宏顺, 冯国平, 李云飞. 嫩茎花椰菜在不同气调贮藏下叶绿素和维生素的降解及活化能研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 172-175.

[10] 乔勇进, 张辉, 唐坚, 等. 采后小白菜叶绿体色素含量变化及其叶绿素降解动力学的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(6): 1692-1698.

[11] 谢晶, 张利平, 苏辉, 等. 上海青蔬菜的品质变化动力学模型及货架期预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 271-278.

[12] 崔国民. 烤烟密集型自动化烤房及烘烤工艺技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[13] 戴培刚, 陈爱国, 陈志厚, 等. 几个烤烟品种成熟期及采后的色素和水分含量变化[J]. 中国烟草科学, 2009, 30(5): 6-9.

[14] 龙翔, 杨虹琦, 李永智, 等. 烘烤过程中不同品种及成熟度烟叶质体色素含量的分析[J]. 云南农业大学学报, 2010, 25(3): 364-367, 387.

[15] 贺帆, 王涛, 王梅, 等. 烘烤过程中烟叶颜色变化与主要化学成分的关系[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(6): 97-102.

[16] 刘春菊, 钱旻, 宋江峰, 等. 速冻莲藕片贮藏过程中品质变化动力学模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 301-308.

[17] 王军, 王栋, 罗庆松, 等. 不同贮藏条件下荷花粉脂质氧化与色泽降解动力学模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊1): 367-373.

[18] 周童, 宋朝鹏, 宫长荣, 等. 利用烤烟叶温测量仪对不同装烟方式烘烤过程中叶温的研究[J]. 云南农业大学学报, 2014, 29(2): 203-207.

[19] 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), 2017, 42(3): 118-123.