

# 卷烟热裂解香料及其热解规律研究进展

刘浩<sup>1</sup>, 周冰莹<sup>1</sup>, 胡永华<sup>2</sup>, 徐志强<sup>2</sup>, 吴泽宇<sup>1</sup>, 惠爱玲<sup>1</sup>, 张文成<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学食品与生物工程学院, 农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽 合肥

<sup>2</sup>安徽中烟工业有限责任公司技术中心, 安徽 合肥

收稿日期: 2023年2月17日; 录用日期: 2023年4月29日; 发布日期: 2023年5月11日

## 摘要

基于热裂解是在惰性气氛下使反应物发生热裂解并生成可冷凝挥发组分(热解油)、不可冷凝热解气和固体产物(热解炭), 本文重点探讨加热卷烟裂解、燃烧过程中结构演变规律、产物的生成机理和调控机制, 总结了许多具有综合机理方案的动力学模型, 如Coats-Redfern模型、双高斯分布活化能模型(DG-DAEM)和Toba-CPD模型。通过对烟草热解机理进行研究, 深入理解烟草原料到生物油的转化路径, 并对烟草香味物质提取与分离纯化技术的发展前景进行了展望。

## 关键词

烟草香料, 裂解, 结构演变, 动力学

# Research Progress on Cigarette Pyrolysis Spices and Pyrolysis Principle

Hao Liu<sup>1</sup>, Bingying Zhou<sup>1</sup>, Yonghua Hu<sup>2</sup>, Zhiqiang Xu<sup>2</sup>, Zeyu Wu<sup>1</sup>, Ailing Hui<sup>1</sup>, Wencheng Zhang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Engineering Research Center of Bio-Process from Ministry of Education, School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

<sup>2</sup>Technology Center, China Tobacco Anhui Industrial Co., Ltd., Hefei Anhui

Received: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 29<sup>th</sup>, 2023; published: May 11<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Pyrolysis is the thermal cracking of reactants in an inert atmosphere (under low oxygen atmosphere) and generates condensable volatile fraction (pyrolysis oil), non-condensable pyrolysis gas

\*通讯作者。

文章引用: 刘浩, 周冰莹, 胡永华, 徐志强, 吴泽宇, 惠爱玲, 张文成. 卷烟热裂解香料及其热解规律研究进展[J]. 食品与营养科学, 2023, 12(2): 66-73. DOI: 10.12677/hjfn.2023.122009

and solid products (pyrolysis carbon), this paper synthesizes the current status of domestic and foreign research, focusing on the structure evolution law, product generation mechanism and regulation mechanism during the pyrolysis and combustion of heated cigarettes, and provides an in-depth understanding of the transformation path from tobacco raw materials to bio-oil through the study of tobacco pyrolysis mechanism, and provides an outlook on the development prospect of tobacco aroma substance extraction and separation and purification technology.

## Keywords

Tobacco Flavoring, Cracking, Structural Evolution, Kinetics

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

烟草是当今世界市场上一种主要经济作物。2021年,中国生产212.76万吨烟叶[1],占世界总产量的三分之一。由于卷烟拥有复杂的化学组分,燃烧产生多种热反应过程,在烟草科学以及食品技术等其他领域,鉴定这些芳香化合物并阐明其形成途径对于高级研究非常重要且需要许多烟气成分产生于各种不同的途径,包括从烟草中蒸馏、燃烧、热解等反应。

烟草由大约3800种成分组成,主要化学成分大体上可以分为无机成分和有机成分两大类[2],因为产地和品种不同而有所差异。早期化学组分只能对烟草及烟草制品品质的评价作为辅助和参考,而内部品质的评价主要以感官评价为主[3]。但国内外学者们经过了多年的研究,提出了评价烟草质量体系的化学指标,例如烟碱的含量、糖碱的比例、氮碱的比例等[4]。这些化学指标同卷烟的感官品质息息相关,在一定范围内,烟叶中总氮含量越高,烟量越大,生理强度越合适,协调性越好,口感越舒服。此外,烟叶中的总氮含量越高,香气就越丰富和细腻。尼古丁含量与感官评价指标分数的相关性不显著。总糖和还原糖的含量越高,配位越低,味道越差。酚酮类化合物含量越高,香气越丰富细腻,口感越舒适;然而高浓度的酯类化合物会导致更强的刺激性味道[5],这些研究能够为烟草产品质量的进一步提升指明方向。Yin等[6]通过高效液相色谱及气相色谱质谱联用对淡香型烟草中6种糖类、8种烟草生物碱、17种有机酸、18种氨基酸和4种离子的定量分析,并基于偏最小二乘回归分析法(PLSR)建立了各烟草组分与感官评价间的联系。Frederico等[7]通过化学指纹图谱分析关键烟叶组分和卷烟主流气溶胶成分来预测烟气的感官属性。

在吸烟过程中,在香烟或其他烟草制品的燃烧区,在不同浓度的氧气存在下,这些物质都会受到高达950°C的温度影响。烟草烟雾中已发现约8000种化学成分[8],其中大多数是微量物质,目前对烟气成分的检测极限约为100 pg。香烟烟雾中存在的化合物主要是由于烟叶中存在的挥发性和半挥发性有机化合物的热解吸(直接输送或蒸馏)或热解和氧化过程从烟叶的(大部分非挥发性)成分产生新的溶质(热解分解和热解合成)。大量这些化合物具有重要的感官特性,并负责香烟烟雾的香气。

## 2. 烟草的热解特性

### 2.1. 热解产物

烟草的热解产物繁多且复杂,当前国内外的研究都集中在热解过程中生成的香味物质或有毒有害物

质上, 针对性的对卷烟产品进行“减焦降害”的改良。其中芳香类化合物是卷烟吃味的主要影响因素, 即使在相对较低的温度下, 芳香风味化合物也会发生热降解。例如, 在燃烧有香味的蜡烛或熏香时, 可能会发生芳香风味化合物的热氧化降解[9]。相反, 芳香风味化合物也可以在相对较低的温度下通过脂质氧化或美拉德反应形成。例如刘秀华等[10]进行烟草低温燃吸的产物在线分析, 发现了 3-呋喃甲醇、糠醛、糠醇、烟碱等有机成分。

罗昌荣等[11]采用 10 步逐级裂解研究烟叶释放的物质与温度的关系, 每一次裂解都是在前次裂解后残留的样品上进行, 把每一步裂解的产物转移到气相色谱进行分离和质谱鉴定, 结果表明温度低于 200℃ 时只检测到尼古丁、新植二烯等挥发性物质, 此时烟草中的化合物主要以蒸馏的方式逸出。在 200℃~250℃ 范围内检测到尼古丁的含量增长迅速, 推测是尼古丁盐发生了裂解反应, 此时新植二烯已经完全挥发。300℃ 左右是多数挥发性香味物质的沸点, 烟叶中碳水化合物形成的糠醛类、酮类化合物开始出现, 同时检测到长链脂肪酸, 如亚油酸、亚麻酸、棕榈酸和月桂酸等物质。400℃~500℃ 是烟叶中糖类、氨基酸类和香料前体物发生美拉德反应的主要阶段, 此时反应生成了大量的芳香类和异戊二烯类化合物, 其中包括香叶基丙酮、法尼基丙酮、茄尼酮和新植二烯等物质。卷烟在 600℃ 时裂解产生了大量的苯类和稠环芳香类化合物, 蛋白质在此时裂解产生甲基吡啶、甲基吡咯等含氮杂环化合物[12]。

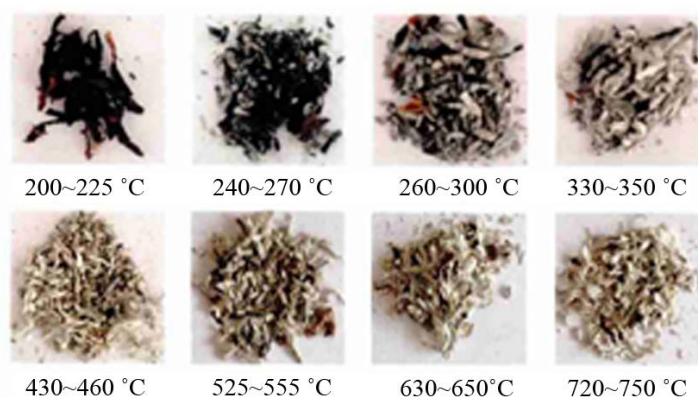


Figure 1. Physical morphology of cut tobacco after gradual heating and combustion in air [12]

图 1. 烟丝在空气中逐步升温燃烧后的物理形态[12]

烟丝在空气氛围中快速燃烧的反应历程先由裂解反应主导再到氧化反应的过渡阶段, 由图 1 可以看出 225℃ 之前烟丝呈焦黑色[12], 说明此时以热解反应为主, 330℃~350℃ 烟丝色泽由黑炭被氧化成白色烟灰, 此时氧化反应占主导, 且温度越高氧化反应越明显, 焦油和大部分的香分在燃烧温度达到 330~350℃ 温度段时就已大量生成, 继续升高温度对焦油的产量贡献不大[13]。

卷烟在同位素标记的氧气和二氧化碳中气氛下发生燃烧或裂解[14], 结果表明, 大约 30% 的一氧化碳是由烟草成分的热分解形成的, 大约 36% 是由烟草燃烧形成的, 至少 23% 由二氧化碳的吸热还原生成。

## 2.2. 卷烟热重分析

通常情况下在实验室中样品的状态、温度和气氛条件是可控的, 因此热重分析实验(Thermogravimetric Analysis, 简称 TG 或者 TGA)具有很高的精确度, 这使热重实验成为研究挥发分脱除和燃烧动力学的有力工具。在含氧气氛下, 过高的升温速率可能导致样品着火或不受控制的燃烧, 使得样品的真实温度与设定温度差距较大, 因此, TGA 仅能在相对较低的升温速率下使用。

李巧灵等[15]根据不同年份、区域、部位的烟草原料绘制了 20 种样品的热重曲线图, 客观描述了不

同烟草样品之间的热解差异度。秦国鑫等[16]采用热重-差示扫描量热联用(TG-DSC)方法, 分析比较了烤烟中部叶丝、膨胀梗丝、膨胀烟丝和再造烟叶在程序升温下的燃烧过程, 结果表面膨胀烟丝在较高升温速率(15 和 20°C/min)下的燃烧特性最好, 4 种烟草生物质在较低的升温速率(5 和 10°C/min)下燃烧特性差异不大。

## 2.3. 卷烟热解动力学模型

### 2.3.1. 分布活化能模型

TGA 测量了热失重过程中由于挥发分脱除或烧失所造成的总质量损失。而这些反应过程或多或少是相互重叠的, 因此, 需要构建一个合适的动力学模型, 考虑到热转化过程中可能同时发生的两个或两个以上的反应, 从而评价整个热失重过程。目前, 国内外研究人员进行了一些关于卷烟原料热解的反应动力学模型的相关研究: 张晓宇等[17]将采用多重扫描速率非等温法中的 Flynn-Wall-Ozawa 方法拟合惰性气氛和含氧气氛中的烤烟动力学分析, 计算得出所有转化率  $\alpha$  相同的条件下,  $\lg(\beta)$  与  $1/T$  之间都有较好的线性关系。Li [18]基于热重数据的 Coats-Redfern 方法用于测定和比较烟梗的热解动力学参数, 化学反应模型可以精确的描述样品的热解阶段。王昭等[19]在烤烟烟叶热重实验的基础上, 使用分布活化能模型(DAEM)计算中部部位烟草的热解动力学参数。

### 2.3.2. Friedman 微分法

Wu 等[20]采用 Friedman 微分法和迭代线性积分等转化法拟合 TG 曲线, 获得了烟草废弃物热解和燃烧的有效活化能。烟草废弃物热解和燃烧的有效活化能随转化程度的不同而变化很大, 对于烟草废弃物的热解和燃烧, 其范围分别为 144~338 kJ/mol 和 118~257 kJ/mol, 还得到了有效活化能、温度范围、转化率和烟草废弃物组分反应之间的关系。目前 Friedman 法被认为是所有等反演方法中最精确的一种[21]。

### 2.3.3. 基于随机森林算法的卷烟热解动力学模型

近年来, 随着人工智能方法的发展, 人们发现神经网络(Artificial Neural Network, ANN) [22]、随机森林(Random Forest, RF) [23]等算法能够较好地处理热解相关的非线性问题。如 Xing [24]等人的研究, 通过从数据库中拟合动力学参数来预测基于生物质化学成分和加热条件的 CFD 应用中单步模型的动力学参数, 建立经验关联(EC)、人工神经网络(ANN)和随机森林(RF)三种模型并对其性能进行了比较, 训练和验证结果表明, 随机森林模型取得的效果最好。邢江宽[25]等采用数值方法进行全局反应热解模型的动力学参数拟合, 能够较为准确地预测训练数据库中的生物质热解的动力学参数( $R^2 > 0.92$ ), 并能够准确预测验证数据库中的多种生物质的热解过程( $R^2 > 0.93$ )。

## 3. 单体物质在卷烟中的热裂解规律

目前, 国内外有关加热卷烟化学成分的研究主要集中于芯材原料的香味成分释放和转移分析、毒理学评价等研究, 而单体香原料在加热卷烟中的转移释放行为也非常重要。

### 3.1. 糖类

糖类是烟草组成成分中最主要的物质, 也是影响烟草香气与风味形成的关键因素[26]。1969 年, Francis [27]在玫瑰花瓣中检测到糖结合型单萜醇, 开辟了香气研究的新领域, 即糖结合型香气化合物的研究。烟草的含糖量取决于烟草品种、地理位置、收获情况, 更取决于加工过程中的烘烤条件(温度、时间和湿度) [28]。相较于单糖、二糖可以为烟气提供良好的香味物质, 多糖则对烟草抽吸品质存在不良影响[29]。且糖类化合物除是香气物质的前体外也是许多有害化合物的前体, 如甲醛和 5-羟甲基糠醛等[30]。

糖苷在香气挥发物中起着积累、储存和运输的作用。在许多水果[31]和植物[32]中，“结合态”挥发物的含量比游离挥发物的含量高得多。从现有文献中可以看出，最常见的糖苷是O- $\beta$ -D-葡萄糖苷和O- $\beta$ -D-二糖苷。

Kazuhsa Mitsui 等[33]发现对挥发性部分的组成影响最大的部分是含有氨基酸的组分，例如脯氨酸、果糖和葡萄糖，裂解过程中通过美拉德反应产生的大量氨基酸和糖有助于烟叶香气和香烟烟雾。

糖苷类化合物的热解反应十分复杂，以 3-氧代- $\alpha$ -紫罗兰醇- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖苷的主要裂解产物通过降解、环化、重排、脱氢等反应形成巨豆三烯酮及其同分异构体和 3-氧代- $\alpha$ -紫罗兰醇[34]，裂解反应推导如图 2 所示。

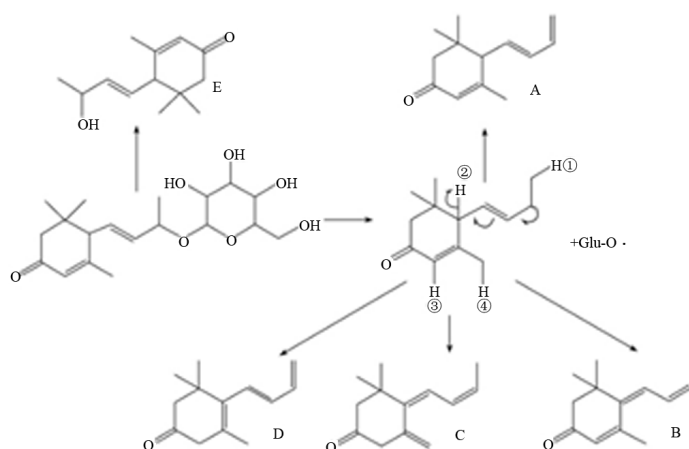


Figure 2. Main cleavage pathways of 3-oxo- $\alpha$ -ionol- $\beta$ -D-glucopyranoside [34]

图 2. 3-氧代- $\alpha$ -紫罗兰醇- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖苷裂解的主要途径[34]

还原性糖含量在很大程度上决定了烟草的质量。烟叶内还原性糖燃烧裂解，使烟气呈酸性(pH 值 5.3~6.5)，从而使卷烟吸味醇和、感官舒适。其次，还原性糖还能增加烟叶的韧性及弹性，降低烟叶破损率[35]。在一定范围内，还原性糖含量高的烟叶品质好，然而含量过高则将影响烟叶内部的酸碱平衡，使烟叶吸味平淡、感官较差，同时使得燃吸过程产生较多的焦油等有害成分，例如纤维素和淀粉在高温(250℃以上)燃烧生成的甲醛和乙醛等醛类化合物，这些化合物吸入比吞食更加危险，因为人体呼吸系统缺乏醛类的解毒途径[36]。

尽管已有许多关于烟草碳水化合物含量与挥发性化合物之间关系的论文发表，但碳水化合物到芳香化合物的途径仍不完全清楚。进一步的研究应该考虑碳水化合物，包括纤维素和果胶，以形成理想的烟草香味。

### 3.2. 甘油

在实际工业生产中，一款卷烟产品往往会由多种不同种类的烟草混合制成，不同品牌和口味的卷烟其特定比例和配方也各不相同，在加工过程中，还需要向其中加入各类香料、增润剂、保湿剂等多种添加剂以维持其特殊感官的吸食品质。

甘油是生物柴油精炼过程中的主要副产物，将其与废烟草混合热解可有效提高烟草热解产品的质量。甘油的加入有利于烟草热解挥发物的生成，同时提高了烟草热解焦的收率。甘油具有稀释烟气和增加水分的作用，当甘油添加量为 10%和 15%时，烟气中丙烯醛含量增加，烟碱、乙醛、丙醛、芳香胺、亚硝胺、酚类等物质含量降低。Gomez-Siurana 等[37]通过 TG-FTIR 研究了甘油-烟草混合物的热解行为以

及 MCM-41 催化剂催化热解的行为, 并提出甘油与烟草之间可能存在相互作用, 从而影响产生的气体组成。因此, 了解添加甘油对烟草热解特性的影响将有助于烟草废料和甘油的再利用。

#### 4. 结论与展望

目前, 烟草行业主要是在直线型或转盘型吸烟机上抽吸卷烟, 然后测试烟气中的香味成分[38] [39]。但是此法的研究重点是最终的结果, 不能实时的监测热解反应过程, 对热解燃烧过程中香味成分的释放规律进行剖析, 且对于加热非燃烧烟草制品的香味成分释放研究也尚未开展。

未来烟草制品结构向多元化发展, 新型烟草制品大多采用加热不燃烧技术向外界释放尼古丁和烟草香气物质, 吸食未经燃烧的烟草制品既能满足烟民对尼古丁的需求, 同时降低了焦油和尼古丁对呼吸系统的损害, 但由于原料受热条件和烟气生成方式的不同, 加热卷烟存在一定程度的香味不足和生理强度满足感不强的特点。加热卷烟加香技术是弥补香气特征和修饰烟气及口感的重要手段, 而单体香料作为加热卷烟调香的物质基础, 其向加热卷烟烟支不同部分及烟气中的转移行为会直接影响应用效果。

因此, 研究烟草的热解行为和反应机理, 利用热解技术将烟草废弃物转化为先进的液体燃料和化工原料, 可促进烟草废弃物资源化利用和无害化利用, 开发出高效、环保的裂解工艺, 对于开发烟草的健康利用技术有深远意义。

#### 基金项目

安徽中烟工业有限责任公司科技计划项目(编号 2021169)。

#### 参考文献

- [1] 国家统计局. 家数据年度数据——主要农作物产品产量[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0D0F&sj=2021>, 2023-02-05.
- [2] 杨彩艳, 莫丽娟, 孙佩玲. 烟草化学成分及生物活性研究现状[J]. 天然产物研究与开发, 2016, 28(10): 1657-1663, 1621.
- [3] 乔学义, 王兵, 马宇平, 等. 烤烟烟叶质量风格特色感官评价方法的建立与应用[J]. 烟草科技, 2014(9): 5-9.
- [4] Chen, J., He, X., Zhang, X., et al. (2021) The Applicability of Different Tobacco Types to Heated Tobacco Products. *Industrial Crops and Products*, **168**, Article ID: 113579. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113579>
- [5] 赵璐, 王丙武, 宋中邦, 高玉龙, 李文正, 李梅云, 隋学艺, 吴兴富, 焦芳婵, 尚善斋, 汤建国, 李永平. 基于感官评价的加热不燃烧卷烟原料品种(系)筛选[J]. 烟草科技, 2020, 53(1): 21-28
- [6] Yin, F., Karangwa, E., Song, S., et al. (2019) Contribution of Tobacco Composition Compounds to Characteristic Aroma of Chinese Faint-Scent Cigarettes through Chromatography Analysis and Partial Least Squares Regression. *Journal of Chromatography B*, **1105**, 217-227. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2018.12.001>
- [7] Soares, F.L.F., Marcelo, M.C.A., Dias, J.C., et al. (2020) Chemosensory Aerosol Assessment of Key Attributes for Tobacco Products. *Journal of Chemometrics*, **34**, e3297. <https://doi.org/10.1002/cem.3297>
- [8] Borgerding, M.F., Bodnar, J.A., Chung, H.L., et al. (1998) Chemical and Biological Studies of a New Cigarette That Primarily Heats Tobacco: Part 1. Chemical Composition of Mainstream Smoke. *Food and Chemical Toxicology*, **36**, 169-182. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(97\)00108-7](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(97)00108-7)
- [9] Cosmai, L., Summo, C., Caponio, F., Paradiso, V.M. and Gomes, T. (2013) Influence of the Thermal Stabilization Process on the Volatile Profile of Canned Tomato-Based Food. *Journal of Food Science*, **78**, 1865-1870. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12296>
- [10] 刘秀华, 钟志京, 谢云, 等. 烟丝热解气体产物中有机物的分析[J]. 中国烟草科学, 2007(6): 13-16+21.
- [11] 罗昌荣, 张乾, 印黔黔, 曾令杰, 王兵, 顾文博, 谢雯燕. 多步逐级裂解技术研究卷烟燃时香味成分形成与温度之间的关系[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(12): 96-104.
- [12] Sanders, E.B., Goldsmith, A.I. and Seeman, J.I. (2003) A Model that Distinguishes the Pyrolysis of D-Glucose, D-Fructose and Sucrose from That of Cellulose. Application to the Understanding of Cigarette Smoke Formation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **66**, 29-50. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(02\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(02)00104-3)

- [13] 李巧灵, 刘江生, 邓小华, 等. 烟草热解燃烧过程香味成分的释放变化[J]. 烟草科技, 2014, 328(11): 62-66.
- [14] Baker, R.R. (1987) A Review of Pyrolysis Studies to Unravel Reaction Steps in Burning Tobacco. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **11**, 555-573. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(87\)85054-4](https://doi.org/10.1016/0165-2370(87)85054-4)
- [15] 李巧灵, 陈昆焱, 刘泽春, 等. 基于热重的烟草热解差异度分析[J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 75-79+102. <https://doi.org/10.16135/j.issn1002-0861.2016.0459>
- [16] 秦国鑫, 李斌, 鲁端峰, 等. 烟草生物质燃烧特性与机理研究[J]. 烟草科技, 2015, 48(1): 76-81. <https://doi.org/10.16135/j.issn1002-0861.20150113>
- [17] 童保云, 张晓宇, 孔俊, 朱青林, 胡永华. 烤烟烟叶叶片及其烟梗的热分解过程和动力学[J]. 烟草科技, 2013(12): 54-58.
- [18] Li, X., Zhao, Q., Han, M., et al. (2022) Pyrolysis Characteristics and Kinetic Analysis of Tobacco Stem Pretreated with Different Solvents. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02280-5>
- [19] 王昭, 戴亚, 马扩彦, 等. 基于分布活化能模型的烟草燃烧动力学特性研究[J]. 烟草科技, 2016, 49(12): 71-78.
- [20] Wu, W., Mei, Y., Zhang, L., Liu, R. and Cai, J. (2015) Kinetics and Reaction Chemistry of Pyrolysis and Combustion of Tobacco Waste. *Fuel*, **156**, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.016>
- [21] Friedman, H.L. (2010) Kinetics of Thermal Degradation of Char-Forming Plastics from Thermogravimetry. Application to a Phenolic Plastic. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, **6**, 183-195. <https://doi.org/10.1002/polc.5070060121>
- [22] Fan, H., Zhang, Y., Su, Z. and Wang, B. (2017) A Dynamic Mathematical Model of a Coal Fired Once-Through Boiler-Turbine Unit. *Applied Energy*, **189**, 654-666. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.074>
- [23] Chen, Z.H., Zhu, Q.J., Wang, X., Xiao, B. and Liu, S. (2015) Pyrolysis Behaviors and Kinetic Studies on *Eucalyptus* Residues Using Thermogravimetric Analysis. *Energy Conversion and Management*, **105**, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.077>
- [24] Xing, J., Wang, H., Luo, K., Wang, S., Bai, Y. and Fan, J. (2019) Predictive Single-Step Kinetic Model of Biomass Devolatilization for CFD Applications: A Comparison Study of Empirical Correlations (EC), Artificial Neural Networks (ANN) and Random Forest (RF). *Renewable Energy*, **136**, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.088>
- [25] 邢江宽, 王海鸥, 罗坤, 等. 预测生物质热解动力学参数的随机森林模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(3): 605-612.
- [26] 范兴, 李博宇, 杨蕾, 等. 烤烟烟梗原料化学成分的差异[J]. 烟草科技, 2022, 55(11): 46-57.
- [27] Francis, M.J.O. and Allcock, C. (1969) Geraniol  $\beta$ -D-Glucoside; Occurrence and Synthesis in Rose Flowers. *Phytochemistry*, **8**, 1339-1347. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)85896-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)85896-3)
- [28] Yang, L.Y., Wang, L.T., Ma, J.H., Li, J.Y. and Gong, M. (2017) Effects of Light Quality on Growth and Development, Photosynthetic Characteristics and Content of Carbohydrates in Tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) Plants. *Photosynthetica*, **55**, 467-477. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0668-x>
- [29] 黄沛. 烤烟化学成分与感官评吸的相关分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(28): 288-290. <https://doi.org/10.13989/j.cnki.0517-6611.2015.28.105>
- [30] 杨滢. 烟草纤维素结构及燃烧热解特性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [31] Boulanger, R. and Crouzet, J. (2000) Free and Bound Flavour Components of Amazonian Fruits: 2. Cupuacu Volatile Compounds. *Flavour and Fragrance Journal*, **15**, 251-257. [https://doi.org/10.1002/1099-1026\(200007/08\)15:4<251::AID-FFJ905>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/1099-1026(200007/08)15:4<251::AID-FFJ905>3.0.CO;2-2)
- [32] Wang, D., Yoshimura, T., Kubota, K. and Kobayashi, A. (2000) Analysis of Glycosidically Bound Aroma Precursors in Tea Leaves. 1. Qualitative and Quantitative Analyses of Glycosides with Aglycons as Aroma Compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **48**, 5411-5418. <https://doi.org/10.1021/jf000443m>
- [33] Mitsui, K., David, F., Dumont, E., Ochiai, N., Tamura, H. and Sandra, P. (2015) LC Fractionation Followed by Pyrolysis GC-MS for the in-Depth Study of Aroma Compounds Formed during Tobacco Combustion. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **116**, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.10.004>
- [34] 王燕, 刘志华, 刘春波, 陈永宽, 蒋丽红, 王亚明. 烟草中两种紫罗兰醇葡萄糖苷衍生物的分离鉴定及热分析研究[J]. 分析测试学报, 2012, 31(1): 22-28.
- [35] Shen, D.K. and Gu, S. (2009) The Mechanism for Thermal Decomposition of Cellulose and Its Main Products. *Biore-source Technology*, **100**, 6496-6504. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.095>
- [36] Carmines, E.L. and Gaworski, C.L. (2005) Toxicological Evaluation of Glycerin as a Cigarette Ingredient. *Food and Chemical Toxicology*, **43**, 1521-1539. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.04.010>

- 
- [37] Gómez-Siurana, A., Marcilla, A., Beltrán, M., Berenguer, D., Martínez-Castellanos, I., Catalá, L. and Menargues, S. (2014) TGA/FTIR Study of the MCM-41-Catalytic Pyrolysis of Tobacco and Tobacco—Glycerol Mixtures. *Thermochemical Acta*, **587**, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.04.017>
- [38] 谢剑平, 赵明月, 吴鸣, 赵晓东, 王昇, 谢复炜. 白肋烟重要香味物质组成的研究[J]. 烟草科技, 2002(10): 3-16.
- [39] 霍现宽, 刘珊, 崔凯, 唐培培, 曾世通, 孙世豪, 宗永立. 加热状态下烟草烟气香味成分释放特征[J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 37-45.