

香椿干燥特性及其特征香气化合物热降解动力学

张乐, 史冠莹, 蒋鹏飞, 赵丽丽, 王赵改*

(河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南郑州 450002)

摘要: 对香椿干燥过程中水分迁移规律进行研究, 同时考察不同热处理条件对香椿的特征香气有机化合物之一 2-巯基-3,4-二甲基-2,3-二氢噻吩 (2-Mercapto-3,4-Dimethyl-2,3-Dihydrothiophene, MDD) 稳定性的影响, 分析 MDD 热降解的动力学以及热力学规律。结果表明: 热处理温度越高, 香椿干燥速率越快, 符合传统的干燥速率变化规律。MDD 降解过程符合一级动力学反应规律和 Arrhenius 模型, 反应速率常数介于 $0.015\ 5\sim 0.034\ 5\ \text{min}^{-1}$ 之间, 并且随着处理温度的升高而增大, 不同温度下半衰期分别为 44.719、32.239、20.091 min, 随着干燥处理温度的升高而呈现出减少的变化趋势, 反应的活化能 (E_a) 为 39.052 kJ/mol。焓变 (ΔH) 为正值说明 MDD 热降解过程是吸热反应, 吉布斯自由能 (ΔG) 也为正值, 说明 MDD 热降解反应为非自发反应。研究可为有效控制香椿加工生产过程特征风味物质的降解提供理论依据。

关键词: 香椿; 干燥特性; MDD; 降解动力学

文章编号: 1673-9078(2023)08-257-263

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.8.0799

Drying Characteristics of *Toona sinensis* and Thermal Degradation Kinetics of Its Characteristic Aroma Compounds

ZHANG Le, SHI Guanying, JIANG Pengfei, ZHAO Lili, WANG Zhaogai*

(Agricultural Products Processing Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The moisture transfer pattern during the drying process of *Toona sinensis* was studied, and the effects of different heat treatment conditions on the stability of the characteristic aroma compound of *Toona sinensis*, 2-mercapto-3,4-dimethyl-2,3-dihydrothiophene (MDD), were investigated. The kinetics and thermodynamics of MDD thermal degradation were analyzed. The results showed that the higher the temperature for heat treatment, the higher the drying rate for *Toona sinensis*, which was in accordance with the rate changing trend for traditional drying. The MDD degradation process accorded with the first-order kinetics and Arrhenius model. The reaction rate constants ranged from $0.015\ 5$ to $0.034\ 5\ \text{min}^{-1}$ and increased with an elevated heat treatment temperature. The half-life values ($t_{1/2}$) at different temperatures were 44.719, 32.239 and 20.091 min, respectively, and decreased with an increase of thermal treatment temperature. The activation energy (E_a) value of the reaction was 39.052 kJ/mol. The positive activation enthalpy (ΔH) value indicated that the thermal degradation of MDD was an endothermic reaction, and the positive Gibbs free energy (ΔG) value indicated that MDD thermal degradation was a non-spontaneous process. The results provide a theoretical basis for effective control of the degradation of characteristic flavor substances in *Toona sinensis* processing process.

Key words: *Toona sinensis*; drying characteristics; MDD; degradation kinetics

引文格式:

张乐, 史冠莹, 蒋鹏飞, 等. 香椿干燥特性及其特征香气化合物热降解动力学[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 257-263

ZHANG Le, SHI Guanying, JIANG Pengfei, et al. Drying characteristics of *Toona sinensis* and thermal degradation kinetics of its characteristic aroma compounds [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 257-263

收稿日期: 2022-06-24

基金项目: 中原科技创新领军人才项目 (234200510004); 河南省农业科学院自主创新项目 (2022ZC59); 河南省科技攻关项目 (232102110128; 232102110153); 河南省农业科学院新兴学科发展专项 (2023XK06)

作者简介: 张乐 (1987-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: zhangle825@163.com

通讯作者: 王赵改 (1980-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: zgwang1999@126.com

香椿 [*Toona sinensis* (A.Juss.) Roem], 楝科香椿属, 多年落叶乔木, 广泛分布于中国、印度、缅甸、泰国、马来西亚等亚洲地区^[1]。香椿嫩芽因其独特的风味和极高的营养价值常作为蔬菜食用。然而香椿嫩芽仅在 3 月下旬、4 月上旬和中旬具有食用价值和经济价值, 供应季节短, 品质劣变快。因此, 进行脱水干燥, 延长香椿的保藏时间, 调节淡季市场很有必要。

热风干燥具有操作简便、生产效率高、成本低廉

等优势,故成为我国脱水蔬菜加工主要采用的脱水方法。但在干燥的过程中可能会导致热敏性物质发生降解。挥发性风味物质在干燥过程中的不同程度的损失,已成为制约产业发展的关键问题。国内外学者对果蔬加工过程营养物质损失和降解的研究集中在对活性成分损失数量、降解动力学、降解过程模拟等方面^[2,3],如傅鑫程等^[4]探究了热风干燥温度对黄花菜干燥动力学以及维生素C降解动力学的影响。矫馨瑶等^[5]对蓝莓多酚的稳定性和降解动力学进行了研究,结果显示多酚的降解符合一级动力学反应规律和 Arrhenius 模型,并且该过程是吸热过程。在挥发性风味研究方面,Xu 等^[6]研究了不同干燥工艺对平阴玫瑰挥发性有机物(VOCs)的影响,结果表明尽管干燥有助于形成少量的 VOCs,但干燥后玫瑰样品中 VOCs 的种类和含量显著减少($P<0.05$)。Ho 等^[7]研究了热处理对棕榈糖风味成分的影响,表明温度较低时主要生成吡嗪类化合物,但当加热 180 min、温度超过 105 °C 时,生成呋喃类化合物。Czégény 等^[8]研究了热处理对烟草中五种物质(香茅醇、薄荷脑、酒石酸、肉桂酸、愈创木酚)的影响,结果表明四种高挥发性物质(香茅醇、薄荷脑、酒石酸、肉桂酸)损失高达 88%~100%。挥发性风味物质的热稳定性受加热温度、加热持续时间和气体成分等影响较大,但关于香气的热降解机制的研究甚少。研究表明含硫类的 2-巯基-3,4-二甲基-2,3-二氢噻吩(2-Mercapto-3,4-Dimethyl-2,3-Dihydrothiophene, MDD)是香椿特征风味物质之一。含硫化合物不稳定易发生氧化反应以及基团转移等降解反应,从而使香气物质组成成分发生重大变化。研究表明 2-巯基-2,3-二氢-3,4-二甲基噻吩很容易失去 H_2S 分子降解为 3,4-二甲基噻吩^[9]。目前关于香椿特征风味物质的热降解规律尚未见报道。

基于此,本研究以可食用香椿嫩芽为材料,研究不同温度热处理条件下香椿热风干燥特性以及特征香气化合物 MDD 的降解规律及动力学模型,为有效控制香椿加工生产过程特征风味物质的降解提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

香椿,品种红油香椿,于 2021 年 4 月 3 日采自河南省农业科学院现代农业研究开发基地香椿园,选取新鲜、健壮、无机械损伤、长度 15 cm 左右的香椿嫩芽采摘,然后快速运至实验室,储存于冰箱(4 °C)内备用,测定其含水量为 84.14%(质量分数,湿基)。

氯化钠分析纯,购自郑州派尼化学试剂厂;正构

烷烃(C_7 - C_{40})、2-甲基-3-庚酮标准品购自德国 Dr.公司;甲醇、二氯甲烷,色谱纯,购于烟台市双双化工有限公司。

1.2 仪器与设备

ME204E 型电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;DF-101S 型恒温磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;BGZ-146 型电热鼓风干燥箱,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;IKA A11 研磨机,艾卡(广州)仪器设备有限公司;7890A-5975C 型气相色谱-质谱联用仪(Gas Chromatography-Massspectrometry, GC-MS),美国安捷伦公司;HP-5MS 石英毛细管色谱(30 m×0.25 mm×0.25 μ m)、萃取头(50/30 μ m DVB/CAR/PDMS)、20 mL 棕色顶空瓶,美国安捷伦公司。

1.3 试验方法

1.3.1 干燥工艺

称取一定质量香椿样品置于干燥烘箱中,分别设定干燥温度为 60、70、80 °C 进行干燥并计时,定时取样直至干基含水率降到(0.30±0.05) g/g 以下结束试验。

1.3.2 干燥曲线

香椿干燥过程中的干基含水率(M_t)和干燥速率(DR)分别采用以下公式计算:

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g} \quad (1)$$

式中:

M_t ——干基含水率, g/g;

m_t —— t 时刻对应的物料质量, g;

m_g ——绝干时物料质量, g。

$$DR = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:

DR——为干燥速率, g/min;

Δm ——为相邻 2 次测量的失水质量, g;

Δt ——为相邻 2 次测定的时间间隔, min。

1.3.3 MDD 含量测定

对初始和最终样品以及取样时间分别为 25、50、75、100、125 min 的香椿样品中 MDD 进行测定,采用顶空固相微萃取方法对挥发性化合物提取,参照 Zhang 等^[10]的方法,采用 GC-MS 联用仪进行测定。具体如下:准确称取 1.000 g 香椿样品以及 0.2 g 氯化钠置于顶空瓶中,混匀,然后加入 5 μ L 内标物质(即质量浓度为 250 mg/L,以甲醇为溶剂配置的 2-甲基-3-

庚酮溶液), 随后用聚四氟乙烯-硅材质的塞子把顶空瓶密封, 把顶空小瓶放置于 40 °C 恒温水浴锅中平衡 15 min, 平衡结束后插入萃取头提取 30 min, 提取结束后, 拔出萃取头插入 GC-MS 联用仪的进样口, 在 250 °C 条件下解吸 5 min。(1) GC 条件: HP-5MS 石英毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm); 载气: He (>99.999%), 流速为 1 mL/min, 不分流进样; 升温程序: 从 40 °C 温度开始, 保持 3 min, 然后以 5 °C/min 的增量上升到 150 °C, 保持 2 min; 最后以 8 °C/min 的增量上升到 230 °C 并保持 5 min^[11]。(2) MS 条件: 传输线和离子源温度分别设置为 250 °C 和 230 °C, 电离模式: 电子电离 (EI), 扫描及范围: 全扫描, m/z 40~800。

通过与相关文献报道的线性保留指数 (LRI) 的比较以及 NIST14 数据库中的比较, 对香椿中挥发性有机化合物进行鉴定。采用内标物质 (2-甲基-3-庚酮) 的峰面积与 MDD 峰面积的比值来计算化合物 MDD 含量。

1.3.4 MDD 降解动力学分析

MDD 残留率计算:

$$R = \frac{C_t}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

R —MDD 残留率, %;

C_0 —为 MDD 的初始含量, μg/g;

C_t —为 t 时刻的含量, μg/g。

MDD 降解动力学计算:

食品中的营养素在贮藏加工过程中很可能会发生不同程度的损失, 并且这些降解一般都符合某种级数的动力学模型^[12,13]。假设香椿中 MDD 的降解反应级数为一级, 应用一级动力学模拟不同温度热处理条件下香椿特征风味物质 MDD 的降解, 动力学公式如下:

一级动力学方程:

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (4)$$

式中:

C_0 —MDD 的初始含量, μg/g;

t —为加热时间, min;

C_t — t 时刻 MDD 的含量, μg/g;

k —为速率常数。

香椿特征风味物质 MDD 半衰期 $t_{1/2}$ (h) 计算公式如下:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (5)$$

式中:

k —为速率常数。

利用 Arrhenius 方程计算活化能如下:

$$\ln k = \ln K_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (6)$$

式中:

E_a —为活化能, kJ/mol;

R —为气体常数 8.314, J/(mol·K);

T —为绝对温度, K;

K_0 —为频率因子。

香椿特征风味物质 MDD 降解的热力学参数: 焓变 (ΔH)、吉布斯自由能 (ΔG) 和熵变 (ΔS) 由下列公示^[3,14]计算:

$$\Delta H = E_a - RT \quad (7)$$

$$\Delta G = -RT \ln \frac{kh}{K_B T} \quad (8)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (9)$$

式中:

h —为普朗克常数 6.626×10^{-34} , J/s;

K_B —为玻尔兹曼常数 1.380×10^{-23} , J/K。

1.3.5 数据分析

采用 SPSS 软件对试验结果进行方差分析 (ANOVA) 和显著性分析 ($P < 0.05$); 使用 Origin 2018 软件进行绘图和数据拟合。

2 结果与分析

2.1 不同干燥参数对香椿干燥特性的影响

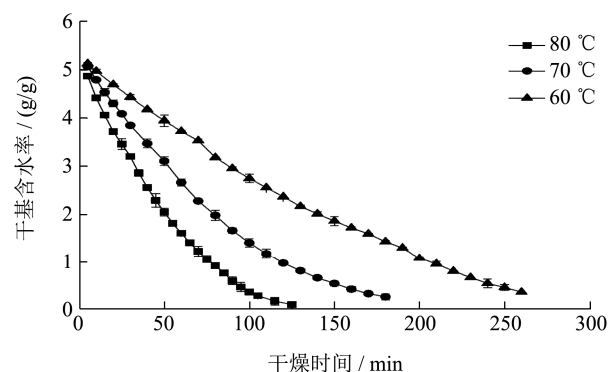


图 1 不同热风干燥温度对香椿干基含水率的影响

Fig.1 Influence of different hot-air temperatures on the dry basis moisture content of *Toona sinensis*

在装载量相同、干燥处理温度不同条件下, 对香椿干基含水率的影响如图 1 所示, 分别以 60、70 和 80 °C 的干燥温度处理香椿, 香椿从初始水分含量到最终水分含量所需的时间分别为 260、180 和 125 min, 表明随着干燥温度的升高干燥过程加快, 干燥时间缩短, 这与其他产品如南瓜、挂面的干燥过程相似^[15-17]。

不同的热处理条件对香椿干燥速率的影响如图 2 所示,干燥速率表现出初始阶段的快速短时间内升速,中间阶段的恒速过程和最后的降速过程,与传统的干燥速率变化规律一致,并且热处理温度越高,干燥速率越快^[18]。

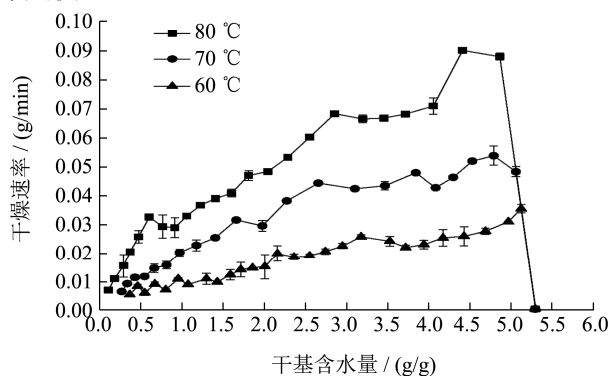


图 2 不同热风干燥温度对香椿干燥速率的影响

Fig.2 Influence of different hot-air temperatures on drying rate of *Toona sinensis*

干燥是食品重要的贮藏和加工方式,可以使果蔬重量减轻、体积缩小、方便运输以及食用方便且可以长期保藏^[19]。目前国内外对果蔬干燥过程中水分迁移规律以及品质变化方面已有相当深入的研究,如土豆^[20]、黄秋葵^[21]、香菇^[22]、枸杞^[23]、苹果^[24]、哈密瓜^[25]、板栗^[26]等。对于不同的干燥过程,大多数物料水分含量在干燥初期下降迅速,然后缓慢下降,直至达到平衡,与本研究结果一致。

2.2 不同热处理温度对香椿特征风味物质

MDD 的影响

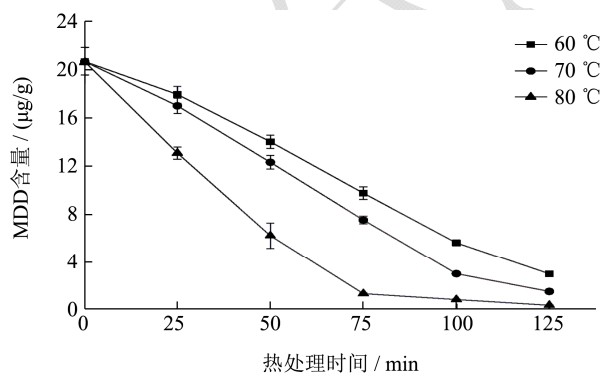


图 3 不同热处理温度对 MDD 含量影响

Fig.3 Effect of different heat treatment temperatures on MDD content

在不同温度干燥条件下随加热时间香椿特征挥发性风味物质 2-巯基-3,4-二甲基-2,3-二氢噻吩 (MDD) 含量变化如图 3 所示,可知 MDD 含量随着热处理时间延长呈逐渐降低趋势,且温度越高降解速度越快。

图 4 显示了 MDD 在不同干燥温度下加热 125 min 保留率变化,以 60、70 和 80 °C 热处理 125 min 后, MDD 保留率分别为 14.36%、7.26%和 1.70%,结果表明,随着热处理温度升高 MDD 保留率越低。研究证实 MDD 很容易失去 H_2S 分子,然后进一步降解形成成为 3,4-二甲基噻吩或 2,5-二甲基噻吩^[9],温度越高降解越快,80 °C 时保留率最低,与本试验结果一致。在 60、70 和 80 °C 下干燥至终点时 MDD 的含量分别为 0.808、0.498 和 0.350 $\mu g/g$,说明在 60 °C 干燥条件下 MDD 最终含量最高,在试验范围内为香椿最佳干燥条件。

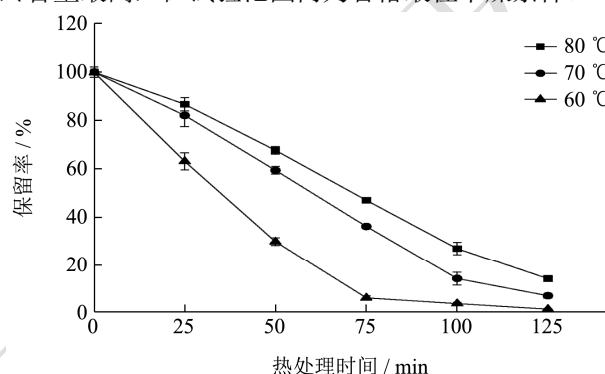


图 4 不同热处理温度下 MDD 保留率

Fig.4 Residual rate of MDD at different heat treatment temperatures

干燥过程会对样品的营养和风味物质产生很大影响,尤其是对风味物质来说,在干燥过程中由于会发生各种复杂的物理和化学反应,会使一部分风味物质损失或一些新的物质生成,从而影响干制品的风味特征^[27]。张艳荣等^[28]研究了干燥方式对姬松茸挥发性香气成分的影响,结果表明姬松茸经热风干燥后醇类化合物如 1-辛醇、薄荷醇和薄荷醇等的含量显著降低,同时生成了以苯甲醛为主的 4 种新的醛类物质。咖啡豆热风干燥过程中随着水分含量的降低,醛类化合物含量逐渐降低,当干燥过程结束时,损失 70%左右^[29],荠菜经过微波干燥后,其特征挥发性风味物质如叶醇、2,6-二甲基环己醇、(E)-2-己烯-1-醇等醇类化合物损失特别严重,醛类化合物损失也高达 61.15%^[30]。而 MDD 在 60 °C 热处理 125 min 后,损失率高达 86%,更高的温度 70 和 80 °C 处理则损失率更高,远高于咖啡豆和荠菜中特征化合物损失,说明香椿特征化合物更不稳定,更容易发生降解。

2.3 不同热处理温度下 MDD 热降解动力学研究

采用一级动力学公式对不同热处理条件下 MDD 的降解过程进行拟合,由图 5 可知为明显线性相关关系。计算了速率常数 k 和半衰期 $t_{1/2}$ 等动力学参数,如表 1 所示,线性回归 R^2 的范围为 0.942 0~0.976 2,线

性拟合较好,表明在热处理过程中 MDD 的降解符合一级动力学方程。根据降解速率常数 k 可以得出降解反应的快慢,并且该速率常数越大反应速度越快^[31],由表 1 可以看出,MDD 降解的速率常数随着温度的升高而变大。在 60、70、80 °C 处理条件下其半衰期分别为 44.719、32.239、20.091 min 呈现减少的趋势,说明升高温度可以加速香椿中 MDD 的降解。

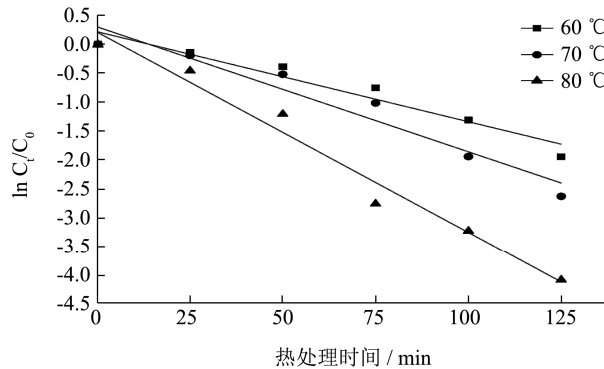


图 5 MDD 在不同温度条件下降解的对数变化趋势

Fig.5 Logarithmic change trend of MDD degradation at different heat treatment temperatures

表 1 MDD 在不同温度下的动力学参数及活化能

Table 1 Parameters of the first-order model and activation energy (E_a) for MDD degradation

温度/°C	K/min^{-1}	R^2	$t_{1/2}/\text{min}$	$E_a/(\text{kJ}/\text{mol})$
60	0.015 5	0.942 0	44.719	39.052
70	0.021 5	0.942 7	32.239	
80	0.034 5	0.976 2	20.091	

图 6 是根据速率常数所得到的 Arrhenius 曲线,可知在 60~80 °C 温度范围,实验结果符合 Arrhenius 模型 (R^2 为 0.985 3)。活化能 (E_a) 通常用来表示达到一个反应的过渡态所需的能量,比较低的 E_a 值表明相应的反应很容易进行^[32]。通过 Arrhenius 模型计算出 MDD 降解的活化能数值为 39.052 kJ/mol,说明香椿的这种特征性挥发性风味物质比较容易发生热降解。

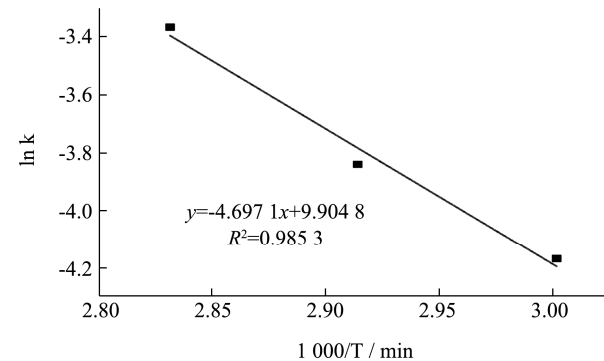


图 6 MDD 热降解的 Arrhenius 曲线

Fig.6 Arrhenius plot for MDD thermal degradation

热降解过程中出现的物理和化学现象可以用热力

学研究参数来表示,从而为热降解动力学研究提供有益的信息。表 2 为不同温度下 MDD 热降解的焓变 (ΔH)、熵变 (ΔS) 和吉布斯自由能 (ΔG)。焓变 (ΔH) 表示反应能够发生反应需要的最低能量,与反应物的化学键强度有关,在反应过程中旧化学键可能发生断裂,另外新化学键可能形成^[5]。 ΔH 越小越有利于反应的发生,当 $\Delta H < 0$ 利于自发反应。由表 2 可知,香椿特征风味物质 MDD 热降解的 ΔH 在不同温度下差别不大,为 36.116~36.282 kJ/mol,说明在试验范围内的温度变化对 MDD 降解的 ΔH 影响不显著,即降解的能量势垒高度与温度无关^[33]。在 60、70、80 °C 温度下 ΔH 均为正值,说明 MDD 降解过程为吸热反应过程,同时证明了前文降解速率随着温度升高而加快的结论。

熵变 (ΔS) 用于描述反应体系内分子的混乱变化情况,与能够实际进行反应的分子数量有关^[5],表 2 中熵变为 -171.571~-172.042 kJ/mol,均为负值,说明活化络合物的结构自由度远小于反应物。吉布斯自由能 (ΔG) 是用来表示体系的自由能变化,是反应物的能量和活化状态之间的差异,用来当作判断反应能否自发进行的标准,当 $\Delta G < 0$ 时,反应自发进行;当 $\Delta G > 0$ 时,反应不能自发进行,但其逆反应可以自发进行^[34]。由表 2 可知, ΔG 均为正值,同时在不同热处理温度下变化不显著,表明该 MDD 降解反应属于非自发反应。

表 2 MDD 在不同温度热处理条件下的热力学参数

Table 2 The rmdynamics parameters of MDD under different heat treatment temperatures

温度/°C	$\Delta H/(\text{kJ}/\text{mol})$	$\Delta G/(\text{kJ}/\text{mol})$	$\Delta S/(\text{kJ}/\text{mol})$
60	36.282	93.441	-171.571
70	36.199	95.396	-172.512
80	36.116	96.872	-172.042

目前,国内外关于降解动力学方面研究主要集中在非挥发性物质维生素 C^[4]、花色苷^[35]、叶绿素等^[36]方面,关于挥发性风味物质的降解动力学还未见相关报道,对香椿特征挥发性风味物质 MDD 热降解动力学及热力学也尚未报道。

3 结论

研究了不同热处理温度下香椿的干燥特性,表明热处理温度越高,干燥速率越快,与其他圆柱形产品的干燥过程相类似,符合传统的干燥速率变化规律。通过研究不同热处理条件下香椿特征挥发性风味物质 MDD 的降解规律及动力学模型,得出随着干燥时间增加 MDD 的含量呈现逐渐下降趋势,而且温度越高降解速度越快,降解反应符合一级动力学过程;其降

解速率常数随着干燥处理温度的升高而增加;然而其半衰期则相反,随着干燥处理温度的升高而减少。热降解的活化能值为 39.052 kJ/mol 比较低,说明香椿特征挥发性风味物质很容易发生降解反应。通过热力学参数计算,得出 MDD 的热降解为吸热非自发反应。为控制香椿干燥过程,提升香椿品质提供了理论依据。

参考文献

- [1] 陆长旬,张德纯,王德槟.香椿起源和分类地位的研究[J].植物研究,2001,21(2):195-199.
- [2] 孙宇,张雨涵,徐皖君,等.蓝靛果微波泡沫干燥过程中维生素 C 降解过程模拟[J].食品工业科技,2022,43(5):79-86.
- [3] Zhang M, Chen H Z, Mujumdar A S, et al. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(6): 1239-1255.
- [4] 傅鑫程,肖佳颖,徐海山,等.黄花菜热风干燥动力学与维生素 C 降解动力学研究[J].食品研究与开发,2019,40(4):14-19.
- [5] 矫馨瑶,李恩惠,王月华,等.蓝莓多酚稳定性及热降解动力学研究[J].中国食品学报,2018,18(1):81-87.
- [6] Xu Baoguo, Feng Min, Chitrakar B, et al. Selection of drying techniques for Pingyin rose on the basis of physicochemical properties and volatile compounds retention [J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132539.
- [7] Ho C W, Aida W M W, Maskat M Y, et al. Changes in volatile compounds of palm sap (*Arenga pinnata*) during the heating process for production of palm sugar [J]. Food Chemistry, 2007, 102(4): 1156-1162.
- [8] Czegeny Z, Bozi J, Sebestyen Z, et al. Thermal behaviour of selected flavour ingredients and additives under simulated cigarette combustion and tobacco heating conditions [J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2016, 121: 190-204.
- [9] Yang Wenxi, Cadwallader K R, Liu Yuping, et al. Characterization of typical potent odorants in raw and cooked *Toona sinensis* (A. Juss.) M. Roem. by instrumental-sensory analysis techniques [J]. Food Chemistry, 2019, 282(1): 153-163.
- [10] Zhang Le, Wang Zhaogai, Shi Guanying, et al. Effects of different thermal processing methods on nutrients and flavor of *Toona sinensis* [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): 16691.
- [11] 史冠莹,赵丽丽,王晓敏,等.红油香椿生长期主要活性物质及挥发性成分动态变化规律[J].食品科学,2022,43(2):276-284.
- [12] 张元元,张映瞳,胡花丽,等.草莓汁贮藏期维生素 C 的降解动力学研究[J].现代食品科技,2020,36(1):120-126.
- [13] Agarry S E, Aremu M O. Modeling of thermal degradation kinetics of ascorbic acid in pawpaw and potato [J]. Global Journal of Engineering Research, 2011, 10: 1-9.
- [14] Mercali G D, Jaeschke D P, Tessaro I C, et al. Degradation kinetics of anthocyanins in acerola pulp: comparison between ohmic and conventional heat treatment [J]. Food Chemistry, 2013, 136: 853-857.
- [15] Guine R P F, Pinho S, Barroca M J. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*) [J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 89: 422-428.
- [16] 蔺志远,施江,谭俊峰,等.提香温度对绿茶(香茶)干燥效能及风味品质的影响[J].食品科学,2020,41(23):153-158.
- [17] 魏益民,王振华,于晓磊,等.挂面干燥过程水分迁移规律研究[J].中国食品学报,2017,17(12):1-12.
- [18] 黄珊,王修俊,沈畅萱.白萝卜薄层热风干燥特性及其数学模型[J].食品与机械,2017,33(8):137-143,193.
- [19] 冯爱国,李国霞,李春艳.食品干燥技术的研究进展[J].农业机械,2012,18:90-93.
- [20] 杨绮云,丁睿.土豆片微波真空干燥动力学模型的研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2017,33(3):324-327.
- [21] Jiang Ning, Liu Chunquan, Li Dajing, et al. Evaluation of freeze drying combined with microwave vacuum drying for functional okra snacks: Antioxidant properties, sensory quality, and energy consumption [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 82: 216-226.
- [22] 杨伊琳,丁俊雄,吴小华,等.香菇热风干燥特性及动力学模型[J].中国农业大学学报,2022,27(4):135-144.
- [23] 赵丹丹,陈冬,彭郁,等.枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析[J].中国食品学报,2018,18(3):114-124.
- [24] 王雪媛,高琨,陈芹芹,等.苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J].农业工程学报,2015,31(12):275-281.
- [25] 张雪波,刘显茜,邹三全,等.哈密瓜切片热风干燥特性及数学模型[J].食品与机械,2022,38(2):130-136,142.
- [26] 张乐,李鹏,王赵改,等.板栗片微波真空干燥的动力学模型及品质分析[J].现代食品科技,2020,36(4):235-243.
- [27] 谢焕雄,胡志超,王海鸥,等.真空冷冻干燥对柠檬挥发性风味化合物保留的影响[J].农业工程学报,2018,34(22):282-290.
- [28] 张艳荣,吕呈蔚,刘通,等.不同干燥方式对姬松茸挥发性风味成分分析[J].食品科学,2016,37(10):116-121.
- [29] 杨静园,董文江,陆敏泉,等.咖啡豆的热风干燥特性及其干燥过程中风味成分变化规律研究[J].热带作物学报,2016, 37(5):971-978.
- [30] 张丽,薛妍君,邓金花,等.微波干燥对野生荠菜品质和挥发

- 性物质的影响[J].现代食品科技,2015,31(8):226-236.
- [31] 宋珊珊,吴天祥.火龙果果皮色素的降解动力学研究[J].保鲜与加工,2016,16(5):74-79.
- [32] Chen Ruiyu, Zhang Deyuan, Xu Xiaokang, et al. Pyrolysis characteristics, kinetics, thermodynamics and volatile products of waste medical surgical mask rope by thermogravimetry and online thermogravimetry-Fourier transform infrared-mass spectrometry analysis [J]. Fuel, 2021, 295(1): 120632.1-120632.12.
- [33] Mercali G D, Gurak P D, Schmittz F, et al. Evaluation of nonthermal effects of electricity on anthocyanin degradation during ohmic heating of jaboticaba (*Myrciaria cauliflora*) juice [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 200-205.
- [34] 郑先福,胡晓娟.普通化学[M].北京:中国农业出版社,2017.
- [35] Mercali G D, Jaeschke D P, Tessaro I C, et al. Degradation kinetics of anthocyanins in acerola pulp: Comparison between ohmic and conventional heat treatment [J]. Food Chemistry, 2013, 136(2): 853-857.
- [36] 康三江,张海燕,苟丽娜,等.野生蒲公英漂烫中叶绿素和颜色的热降解动力学[J].食品工业,2020,41(2):66-70.