

# 抗氧化剂 BHT 在油脂体系和煎炸体系中的热损耗规律研究

马素敏, 毕艳兰, 刘伟, 谭丹丹

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

**摘要:** 本文研究了添加 BHT (2,6-二叔丁基对苯甲酚) 的油脂通过 180 °C 高温煎炸 (土豆、豆腐) 或烘箱加热手段处理后, 借助液相(HPLC)和液相-质谱联用(HPLC-MS)分析手段, 探讨了 180 °C 煎炸条件下 BHT 的损耗及转化规律, 并推测 BHT 在油脂中可能存在的转化产物。高温煎炸体系下油脂中 BHT 的损耗率远远高于加热油脂体系; 高温煎炸时, 随着煎炸时间的延长, 煎炸油脂中 BHT 的损耗增大; 高温煎炸时, 煎炸食品组分不同, BHT 的损耗率亦不同; 高温煎炸时, 食品组分不会对 BHT 有富集作用, BHT 的富集损耗近似为 0, 油脂中 BHT 损耗以挥发损耗为主, 转化损耗次之。其中, 挥发损耗主要以母体形式进行, 转化产物主要结构为 1, 2-二-(3,5-二特丁基-4-羟苯基)乙烷 (II) 和 2,6-二叔丁基-4 甲基茴香醚 (IV), 转化产物量很小。总的来说, BHT 在加热油脂体系和煎炸体系中会发生挥发和转化损耗。

**关键词:** BHT; 损耗; 挥发; 转化

**文章编号:** 1673-9078(2016)07-139-144

**DOI:** 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.7.022

## Thermal Loss Patterns of Antioxidant BHT in Oil and Frying Systems

MA Su-min, BI Yan-lan, LIU Wei, TAN Dan-dan

(School of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Oil samples added with BHT (2,6-di-*tert*-butyl-4-methylphenol) was processed by deep frying at 180°C (potato and bean curd) or oven heating. The thermal loss and conversion of BHT were investigated by high-performance liquid chromatography (HPLC) and HPLC-mass spectrometry, and the possible conversion products of BHT in the oil were hypothesized. The results showed that losses of BHT upon deep frying were significantly higher than that in the oven heating system; during high-temperature frying, as frying time increased, the loss of BHT in the oil system were significantly increased. During high-temperature frying, the different ingredients in fried food led to loss of BHT to different extents; BHT was not absorbed by food components, and the enrichment loss of BHT was close to zero. BHT loss occurred mainly through volatilization, followed by conversion. The volatilization loss of BHT primarily yielded its parent form, and the main conversion products were 1,2-di-(3,5-di-*tert*-butyl-4-hydroxyphenyl) ethane (II) and 2,6-di-*tert*-butyl-4-methyl anisole (IV). The yield of the conversion products was low. Therefore, BHT loss can occur via volatilization and conversion in heating oil and frying systems.

**Key words:** butylated hydroxytoluene; loss; volatile; conversion

BHT 又名 2, 6-二叔丁基对苯甲酚, 近些年常被用作食用油脂或者饲用油脂的抗氧化剂, 并且逐渐扩展到膨化食品、馒头和方便面等油脂中使用<sup>[1]</sup>。联合国粮农组织和世界卫生组织 (FAO/WHO)、欧盟及中国均允许将 BHT 作为食品抗氧化剂使用, 并规定在油脂中的最大使用限量为  $200 \times 10^{-6}$ 。

BHT 被用作油脂抗氧化剂以来, 国内外学者对于其抗氧化效果的研究从未间断<sup>[2-3]</sup>。研究认为: BHT 的

收稿日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31271883)

作者简介: 马素敏 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 脂质化学与品质  
通讯作者: 毕艳兰 (1969-), 女, 教授, 硕士研究生, 研究方向: 脂质化学与品质

抗氧化效果不仅与外界温度和油脂种类有关, 而且与其在油脂中的含量有一定的关系<sup>[4]</sup>。Augustin M.A.<sup>[5]</sup>和 Warner C. R.<sup>[6]</sup>通过煎炸实验证明: 随着煎炸时间的延长, 油脂中 BHT、BHA 和 TBHQ 等合成酚类抗氧化剂的含量不断减少。Augustin M.A.<sup>[5]</sup>和 Marmesat S.<sup>[7]</sup>提出抗氧化剂的损耗途径可能有三种: 蒸发、分解和清除自由基反应。但关于 BHT 在油脂中的具体损耗量及形式尚未见相关报道。

近几年, 食品安全问题成为人们关注的热点问题, 作为食品抗氧化剂 BHT 的毒性也备受关注。其毒性主要来自于两个方面: 其一, BHT 在动物代谢过程中产生的转化产物; 其二, BHT 在食品加工和储存过程中可能存在的转化产物<sup>[8]</sup>。关于 BHT 在代谢过程

中的毒性已经有了较多研究<sup>[9]</sup>, 但其在食品加工和储存过程中的转化产物有哪些? 转化量的多少? 对人体的毒性又如何? 研究尚存在许多不足。基于此, 研究 BHT 在煎炸条件的损耗与转化规律非常关键。

本文以添加  $200 \times 10^{-6}$  BHT 的棕榈油为煎炸介质, 测定食品对 BHT 是否具有富集作用; 分析 BHT 在油脂体系中的转化损耗和挥发损耗的量及形式。最终理清 BHT 的损耗及转化规律, 有助于对 BHT 在煎炸过程中的毒性做全面的评价和分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

BHT (纯度  $\geq 99.5\%$ ): 美国 Sigma-Aldrich 公司; 棕榈油: 山东省烟台天茂油脂有限公司; 一级大豆油: 河南阳光油脂集团有限公司, 从生产线上直接取得。(实验所用棕榈油、一级大豆油经检测不含有 BHA、BHT、TBHQ 等合成酚类抗氧化剂); 土豆: 青薯 168 高原红土豆王 (产自河南); 豆腐: 购于郑州本地超市; 甲醇, 石油醚: 天津市科密欧化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

Waters 2695 高效液相色谱仪, 美国 Waters 公司; Agilent 6890N 型气相色谱仪, 美国 Agilent 公司; BS210s 电子天平 (感量 0.001 g), 北京赛多利斯天平有限公司; 80-2 型台式离心机, 金坛市科析仪器有限公司; WGL-125B 鼓风干燥箱, 天津泰斯特仪器有限公司; 威尔宝 EF-101B 单缸电炸炉, 上海乔良炊事机械有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品的准备

##### 1.3.1.1 一定浓度 BHT 棕榈油的制备

以配置  $200 \times 10^{-6}$  BHT 棕榈油为例, 其他浓度均参考此方法。电子天平准确称取 0.250 g BHT 于 300 mL 聚乙烯塑料瓶中, 加入 100 g 油脂溶解, 剧烈晃动 30 min, 得到 BHT 母液 A (浓度  $2500 \times 10^{-6}$ )。准确称取 (准确至 0.001 g) 80 g 母液 A (浓度  $2500 \times 10^{-6}$ ) 于 2.5 L 油桶中, 然后再加入 920 g (准确至 0.01 g) 原油, 剧烈晃动 10 min 后得到 BHT 浓度为  $200 \times 10^{-6}$  的溶液 1000 g, 放置阴凉处备用。

##### 1.3.1.2 土豆条的制备

将购置回的土豆清洗后削皮, 用刀切成长约 6 cm、宽约 0.7 cm、厚约 0.7 cm 的土豆条, 在水中浸泡 5 min, 取出后淋水 3 min, 即得煎炸备用土豆条。

##### 1.3.1.3 豆腐块的制备

将购置回的豆腐清洗干净, 切成长约 4 cm、宽约 4 cm、厚约 0.8 cm 的豆腐块, 在水下冲洗 1 min, 沥干, 即得煎炸所需的豆腐块。

### 1.3.2 加热和煎炸方法

#### 1.3.2.1 加热方法

将事先配制好 BHT 含量一定的油脂于 180 °C 烘箱中鼓风加热, 定时取样, 测定 BHT 含量和转化物结构。

#### 1.3.2.2 煎炸方法

将事先配好的含  $200 \times 10^{-6}$  BHT 的棕榈油 8 kg 倒入煎炸锅, 然后升温至 180 °C (保证 20 min 左右升至 180 °C, 且煎炸过程中油温维持在 174 °C~180 °C 之间。)开始煎炸后以秒表计时, 向其中放入 (100 $\pm$ 5) g 事先准备好的同一规格的土豆 (豆腐), 煎炸 (5 $\pm$ 1) min 取出, 继续添加同等量的食品, 重复上述过程, 定时取油样和食品用于 BHT 含量的测定。

单次煎炸量: 土豆 (100 $\pm$ 5) g, 豆腐 (100 $\pm$ 5) g。

### 1.3.3 BHT 挥发性组分测定

将配置好 BHT 含量 4% 大豆油于 250 mL 单口圆底烧瓶中加热 2 h, 冷凝管回流收集挥发物, 观察实验现象, 并测定瓶口白色晶体物质的结构。

### 1.3.4 煎炸食品中油脂的提取

煎炸食品中油脂采用索氏抽提法提取, 食品质量 100 g 左右, 抽提温度 50 °C, 抽提时间 10 h, 抽提出的毛油采用真空脱溶, 具体操作方法参照 GB/T 5512-2008。

### 1.3.5 油脂中 BHT 损耗率测定

油脂中 BHT 含量测定:

在 NY/T 1602-2008 基础上有所改进, 即用有机溶剂甲醇萃取, 高效液相色谱法 (HPLC) 测定, 外标法定量。

甲醇萃取方法为: 准确称量 1 g 油脂样品于干净试管中, 分三次准确加入 10 mL 甲醇 (4+3+3), 在漩涡振荡器上震荡 2 min (若油脂不融化, 可于 55 °C 水中加热后震荡), 在 2500 r/min 转速下离心 2 min, 将上层清液转移至 10 mL 容量瓶中, 合并三次萃取上清液, 经 0.45  $\mu$ m 微孔过滤器过滤后 HPLC 测定。

HPLC 测定 BHT 条件:

检测器波长 280 nm; 色谱柱: Waters Symmetry C18 柱 (250 mm $\times$ 5  $\mu$ m $\times$ 4.6 mm); 柱温: 35 °C; 进样量 20  $\mu$ L; 样品运行时间 40 min。甲醇: 0.5% 乙酸水 =85:15 (V/V)。

该方法在添加量 (50~200)  $\times 10^{-6}$  时加标回收率为 97.7%~104.3%, 相对标准偏差 (RSD): 0.1%~1.5%,

检出限: 0.01 μg/mL。

损耗率计算:  $BHT \text{ 损耗率} (\%) = [1 - BHT \text{ 剩余含量} (\times 10^{-6}) / BHT \text{ 初始含量} (\times 10^{-6})] \times 100$

### 1.3.6 BHT 转化物结构的测定

按照 1.3.5 中有机溶剂甲醇萃取方法, 提取 BHT 及其可能转化产物。

仪器: 液相色谱-质谱联用仪 Thermo Fisher LTQ-XL; 离子源: ESI; 质量分析器: 离子阱; 色谱柱: Hypersil Hypersil BDS C18 (100 mm×2.1 mm×3 μm); 进样量: 3 μL; CID 能量: 35; 离子模式: 正负离子; 质量范围: 50~1000; 流动相: 甲醇/0.5% 乙酸水溶液=90:10 (V/V)。

### 1.3.7 数据统计分析

所有实验均具有两次或两次以上平行样, 并且经过方差分析, 结果表示为平均值±标准偏差。样品间的差异采用 SPSS16.0 Duncan 显著性分析确定, *p* (Sig.) <0.05 认为是统计学显著。

## 2 结果与讨论

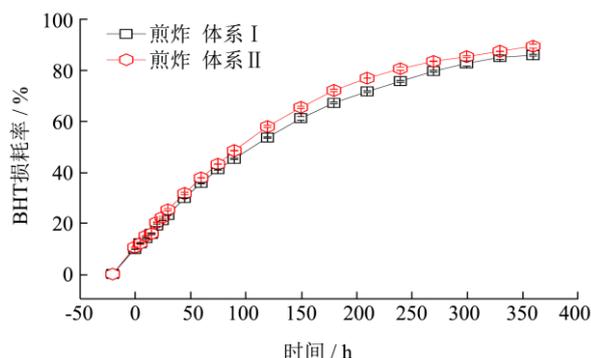


图 1 煎炸体系 I 和 II 中 BHT 损耗率随时间变化图

Fig.1 Change in BHT loss rate in system I and system II over time

注: 煎炸体系 I, 含  $200 \times 10^{-6}$  BHT 的棕榈油中煎炸土豆;

煎炸体系 II, 含  $200 \times 10^{-6}$  BHT 的棕榈油中煎炸豆腐。

选择干基富含淀粉的土豆和富含蛋白质的豆腐

表 2 煎炸体系 I 中煎炸油和抽提油 BHT 含量数据表,  $\times 10^{-6}$

Table 2 BHT contents in frying oil and extracted oil in system I,  $\times 10^{-6}$

取样时间/min	煎炸油 BHT 含量	抽提油 BHT 含量	扣除方法影响后抽提油中 BHT 含量*
10	167.61±0.52	128.02±0.12	157.94±0.15
30	150.03±1.33	127.79±0.73	157.65±0.90
60	125.42±0.48	96.71±0.69	119.31±0.85
120	90.65±0.58	77.32±1.58	95.39±1.95
180	64.13±0.27	55.88±0.32	68.94±0.39

注: \*按照 23.37%BHT 的损耗量, 扣除来自于索式抽提过程的影响, 扣除方法影响后抽提油中 BHT 含量=抽提油 BHT 含量\*(1+23.37%)。

煎炸体系 I 和 II 中油脂 BHT 含量数据如表 2 和 3 所示。从表 2 和表 3 中可以发现, 扣除索式抽提引起

作为煎炸原材料, 考察煎炸体系中 BHT 的损耗规律, 进而推测煎炸体系中 BHT 可能的损耗途径。

由图 1 可知: 随着煎炸时间的延长, 煎炸体系 I 和 II 中煎炸油的 BHT 损耗率均增大。300 min 时, 煎炸体系 I 和煎炸体系 II 中 BHT 损耗率分别为 82.73% 和 85.35%。这可能与 BHT 发生损耗有关。

推测 BHT 的损耗主要有三种途径: 食品富集、挥发和转化。食品富集指 BHT 被食品组分吸附; 挥发指 BHT 以母体或其他形式转移至空气中; 转化指 BHT 自身或与外界物质发生的分解、结合等反应而转变为其他物质。论文以下部分将对 BHT 的具体损耗途径进行分析。

### 2.1 食品的富集作用

由于食品的极性大于油脂, 猜测 BHT 有可能会富集于食品上。为了便于比较实验结果, 将煎炸锅内直接取出的油命名为煎炸油, 而将从食品中经索氏抽提得到的油脂视为抽提油, 比较同一时间下煎炸油与抽提油中 BHT 含量。

由于煎炸食品中油脂的提取过程是在 50 °C 条件下进行, 且伴随大量乙醚挥发、冷凝过程, 这可能会导致 BHT 损耗的增加, 为此, 笔者配制 BHT 浓度为  $100 \times 10^{-6}$  和  $150 \times 10^{-6}$  的棕榈油进行空白校正, 测定索式抽提前后 BHT 含量如表 1。由表 1 可知, 索式抽提操作过程中 BHT 有 (23.37±3.32)% 左右的损耗, 这种损耗可能主要是加热和溶剂挥发引起的。

表 1 索氏抽提过程的 BHT 损耗数据表

Table 1 BHT loss rate during Soxhlet extraction process

BHT 含量 ( $\times 10^{-6}$ )	索氏抽提前 BHT 含量 ( $\times 10^{-6}$ )	索氏抽提后 BHT 含量 ( $\times 10^{-6}$ )	索氏抽提过程导致的 BHT 损耗率/%	平均损耗率/%
150	152.14±0.12	121.66±0.21	20.04±0.43	23.37±3.32
100	102.03±0.34	74.79±0.14	26.69±0.54	

的损耗后, 煎炸体系 I 和 II 的煎炸油和抽提油中 BHT 含量基本一致。例如, 120 min 时, 煎炸体系 I 中煎

炸油和抽提油中 BHT 含量分别为  $90.65 \times 10^{-6}$  和  $95.39 \times 10^{-6}$ 。

这说明食品组分不会对 BHT 有富集作用, BHT 的富集损耗近似为 0。届此可以确定: 煎炸食品体系中 BHT 的损耗主要包括挥发和转化两部分。

表 3 煎炸体系 II 中煎炸油和抽提油 BHT 含量数据表,  $\times 10^{-6}$   
Table 3 BHT content in frying oil and extracted oil in system II,  $\times 10^{-6}$

取样时间/min	煎炸油 BHT 含量	抽提油 BHT 含量	扣除方法影响后抽提油中 BHT 含量*
10	165.72 $\pm$ 0.42	127.33 $\pm$ 0.68	157.09 $\pm$ 0.84
30	145.81 $\pm$ 1.11	120.44 $\pm$ 0.52	148.59 $\pm$ 0.64
60	121.36 $\pm$ 0.67	104.67 $\pm$ 0.61	129.13 $\pm$ 0.75
120	82.23 $\pm$ 0.47	67.87 $\pm$ 0.28	83.73 $\pm$ 0.35
180	54.52 $\pm$ 1.21	47.54 $\pm$ 1.38	58.65 $\pm$ 1.70

注: \*按照 23.37%BHT 的损耗量, 扣除来自于索式抽提过程的影响, 扣除方法影响后抽提油中 BHT 含量=抽提油 BHT 含量\*(1+23.37%)。

## 2.2 BHT 的转化损耗

将添加 4%BHT 油样和空白油样按照 1.3.2 烘箱加热处理 4 h 后, 首先, 通过 HPLC 测定转化产物量, 结果如图 2 所示。其次, 通过 HPLC-MS 测定转化物结构, 结果如图 3~图 6 所示。

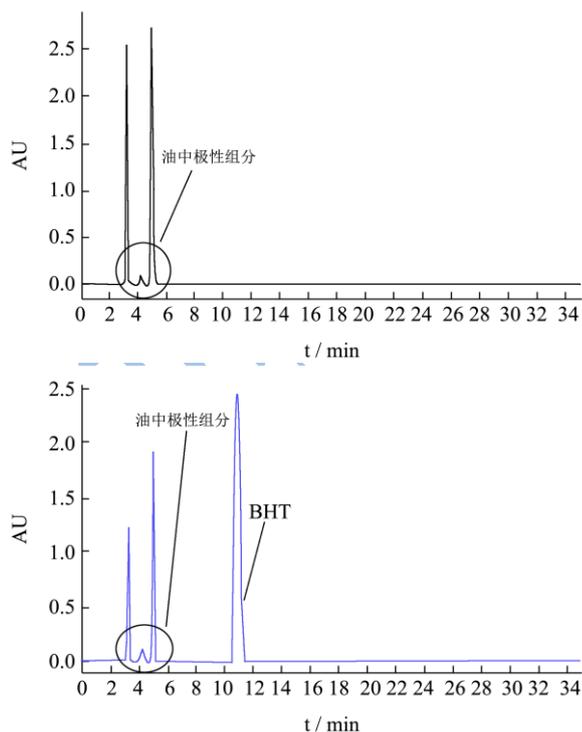


图 2 空白油和添加 4%BHT 的油脂 HPLC 对比图

Fig.2 HPLC chromatograms of blank oil and oil containing 4% BHT

图 2 可以看出, 添加 BHT 油脂样品和空白油样除了 BHT 纯品峰以外, 其他位置出峰基本一样, 推测油脂中 BHT 可能的转化物很少。

对比图 3 和 4 可以得出: 180 °C 热处理后添加 BHT 的样品的甲醇萃取液中多出了荷质比为 437(-) 和 233(-) 的两种物质。对二者进行二级 MS 测定, 结果如图 5 和 6 所示。荷质比 437(-) 的碎片峰是 381(-)、281(-) 和 205(-), 荷质比 233(-) 主要碎片峰是 217(-) 和 205(-), 基于此推测荷质比为 437(-) 和 233(-) 的物质结构分别为 1, 2-二-(3, 5-二特丁基-4-羟苯基)乙烷和 2, 6-二叔丁基-4 甲基茴香醚。其中, 1, 2-二-(3, 5-二特丁基-4-羟苯基)乙烷是 BHT 的二聚物, 2, 6-二叔丁基-4 甲基茴香醚是 BHT 的自由基与甲基结合后形成的稳定化合物。

基于质谱推测出的物质的结构, 笔者推测了 BHT 在油脂中的转化过程结果如图 7 所示。从图 7 中看出, 抗氧化剂 BHT 与油脂分子自由基相遇后, BHT 将酚羟基氢提供给油脂分子自由基, 自身转变为 BHT 自由基, 从而阻断油脂自由基链传播反应, 在 180 °C 条件下的转化产物主要是其二聚物或者结合甲基的异构物。

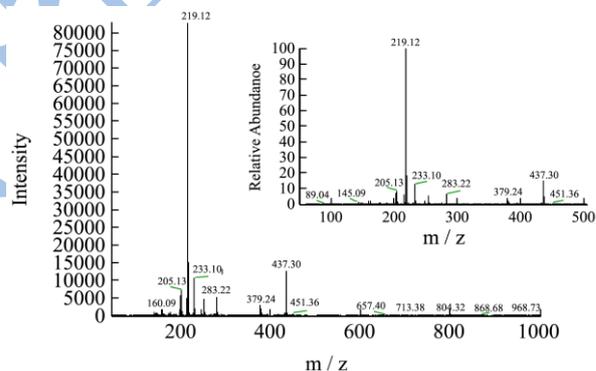


图 3 添加 4%BHT 油脂样品的 180 °C 加热 HPLC-MS 图谱

Fig.3 HPLC-MS chromatograms of the oil sample with addition of 4% BHT after heating at 180 °C

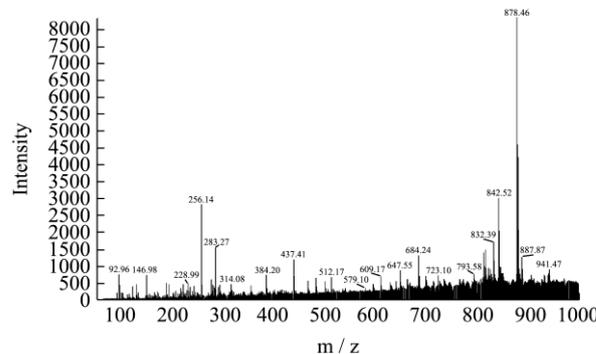


图 4 大豆油样品的 180 °C 加热 HPLC-MS 图谱

Fig.4 HPLC-MS chromatograms of soybean oil after heating at 180 °C

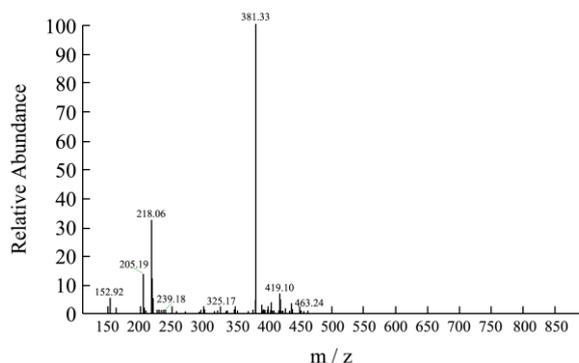


图5 荷质比为 437 (-) 的离子二级 MS 图

Fig.5 MS/MS spectrum of the ion with a mass-to-charge ratio of 437 under negative ionization mode

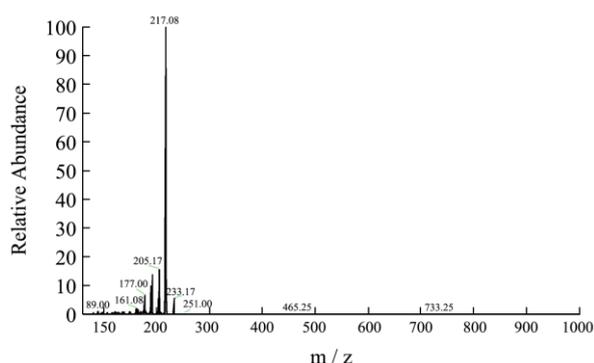


图6 荷质比为 233 (-) 的离子二级 MS 图

Fig.6 MS/MS spectrum of the ion with a mass-to-charge ratio of 233 under negative ionization mode

综上所述: 180 °C 热处理 4 h 时, 油脂中 BHT 的转化产物为 1,2-二-(3,5-二特丁基-4-羟苯基)乙烷(II) 和 2,6-二叔丁基-4 甲基茴香醚 (IV), 但是转化的量很少。

表 4 180 °C 时加热体系和煎炸体系中 BHT 的损耗率

Table 4 BHT loss rate in heating and frying oil systems at 180 °C

时间/min	BHT 的损耗率/%			BHT 损耗增加率*/%	
	加热体系	煎炸体系 I	煎炸体系 II	煎炸体系 I	煎炸体系 II
0	0	0	0	0	0
60	6.20±0.17	35.72±0.34	37.76±0.35	476.13±7.62	509.03±3.85
120	13.29±0.21	53.57±0.68	57.87±0.47	303.09±2.31	335.44±3.13
360	26.53±0.55	67.16±0.18	72.05±0.57	153.15±1.71	171.58±0.92

注: BHT 损耗增加率=(煎炸体系 BHT 损耗率-加热体系 BHT 损耗率)/加热体系 BHT 损耗率×100。

对于 BHT 的挥发形式笔者也做了一定的研究。将添加 4%BHT 的大豆油于 180 °C~200 °C 加热 4 h 后, 瓶口有白色晶体形成, 如图 8 所示。将白色晶体甲醇溶解后 HPLC-MS 测定其主要成分, 结果如质谱图 9 所示, 质谱图中只有荷质比为 219 (-) 的物质。由此可知: 180 °C 加热条件下, 油脂中 BHT 以母体形式的挥发是其主要的损耗形式。

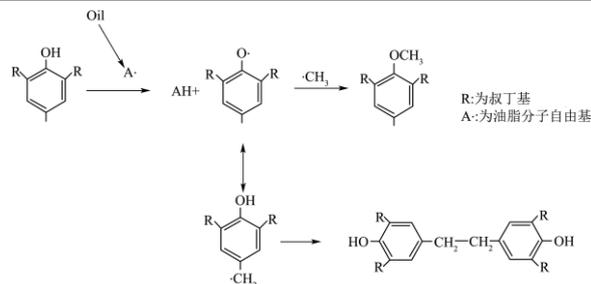


图 7 BHT 在油脂中转化过程图

Fig.7 Conversion process of BHT in oil system

### 2.3 BHT 挥发损耗量及形式

为了深层次考察 BHT 的损耗路径, 实验对纯油脂加热体系—180 °C 加热棕榈油和煎炸食品体系—180 °C 棕榈油中煎炸豆腐、土豆的 BHT 损耗率进行了对比, 结果如表 4。

由表 4 可知: 煎炸体系中 BHT 损耗率远远高于加热棕榈油脂体系, 例如, 360 min 时煎炸体系 I 中 BHT 的损耗率是加热棕榈油脂体系的 1.53 倍; 煎炸体系 II 中 BHT 的损耗率要高于煎炸体系 I, 例如, 120min 时煎炸体系 I 和 II 中 BHT 的损耗率分别为 53.57% 和 57.87%, 后者比前者高 4.3%。笔者认为这些差异与食品的翻滚搅拌作用和食品中水分挥发有关。在煎炸过程中食品表面的水分迅速蒸发, 内层的水通过毛细管和对流作用, 从壳内的孔隙通道逸出到煎炸油中, 然后再以水蒸气的形式进入空气。水蒸气的挥发降低了 BHT 挥发的平衡压力, 使其挥发更为容易。对于煎炸体系 I 和 II 中 BHT 损耗率的不同可能主要是土豆和豆腐含水量不同造成的。Peled M. 等人<sup>[10]</sup>也证明通入水蒸气可能使 BHT 损耗增加 10%。

综上所述: 煎炸食品体系中, BHT 损耗路径的顺序是: 挥发损耗>转化损耗>富集损耗, 其中挥发主要以母体形式进行。

### 3 结论

煎炸体系中, 食品组分不会富集 BHT, BHT 损耗路径的顺序是: 挥发损耗>转化损耗。其中, BHT

挥发损耗主要以母体形式进行, 转化损耗很小, 转化产物的主要形式为 1, 2-二-(3, 5-二特丁基-4-羟苯基)乙烷 (II) 和 2, 6-二叔丁基-4 甲基茴香醚 (IV)。



图 8 BHT 挥发结晶图

Fig.8 Image of crystallization of BHT through volatilization

注: BHT 含量为 4% 的大豆油; 加热温度, 180~200 °C; 加热时间, 4 h。

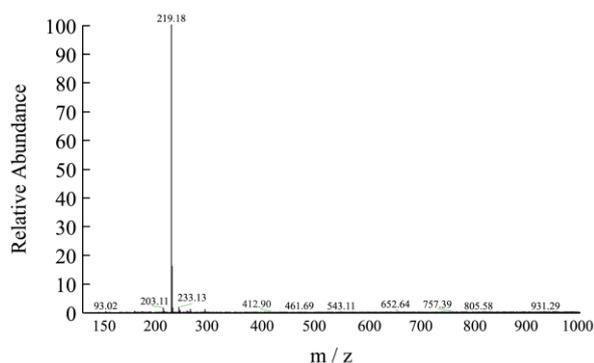


图 9 BHT 挥发物质谱图

Fig.9 MS spectrum of the volatile substance (BHT) from the oil system after heating at 180~200

## 参考文献

- [1] Suh H J, Chung M S, Cho Y H, et al. Estimated daily intakes of butylated hydroxyanisole (BHA), butylated hydroxytoluene (BHT) and tert-butyl hydroquinone (TBHQ) antioxidants in Korea [J]. Food Additives and Contaminants, 2005, 22(12): 1176-1188
- [2] Bagheri R, Sahari M A, Ariaii P. Comparison between the effects of  $\alpha$ -tocopherol and BHT on the lipid oxidation of Kilka fish [J]. World Applied Sciences Journal, 2013, 28(9): 1188-1192
- [3] Inanc T, Maskan M. Testing the Antioxidant Effect of Essential Oils and BHT on Corn Oil at Frying Temperatures: a Response Surface Methodology [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2013, 90: 1845-1850.
- [4] Pereira-de A, David A, Villalba Rodriguez, et al. Effectiveness of antioxidants on lipid oxidation and lipid hydrolysis of cod liver oil [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2011, 113(11): 1395-1401
- [5] Augustin M A, Berry S K. Efficacy of the antioxidants BHA and BHT in palm olein during heating and frying [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1983, 60(8): 1520-1523
- [6] Warner C R, Daniels D H, Lin F S, et al. Fate of antioxidants and antioxidant-derived products in deep-fat frying and cookie baking [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1986, 34(1): 1-5
- [7] Marmesat S, Morales A, Velasco J, et al. Action and fate of natural and synthetic antioxidants during frying [J]. International Journal of Fats and Oils, 2010, 61(4): 333-340
- [8] Nicoli M C, Anese M, Parpinel M T, et al. Loss and/or formation of antioxidants during food processing and storage [J]. Cancer Letters, 1997, 114(1-2), 71-74
- [9] Panicker V P, George S, Krishna D. Toxicity study of butylated hydroxyl toluene(BHT) in rats [J]. World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 2014, 3(8): 758-763
- [10] Peled M, Gutfinger T, Letan A. Effect of water and BHT on stability of cottonseed oil during frying [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1975, 26(11): 1655-1666