

油炸土豆片中丙烯酰胺辐照消解效应研究

崔龙¹, 王倩倩^{1,2}, 王娴¹, 许勃¹, 董威杰¹, 陈云堂¹, 石晓华²

(1.河南省科学院同位素研究所有限责任公司, 郑州 450015; 2.郑州大学, 郑州 450001)

摘要: **目的** 研究油炸土豆片中丙烯酰胺辐照消解规律, 以及含水量、添加剂对其辐照效应的影响, 探讨淀粉类食品中已生成丙烯酰胺的消解技术。**方法** 采用 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 对油炸土豆片进行辐照处理, 研究吸收剂量、含水量, 以及柠檬酸、苹果酸、 Na_2CO_3 、柠檬酸三钠、异抗坏血酸钠、芝麻酚等对丙烯酰胺含量随吸收剂量变化的变化规律。**结果** 丙烯酰胺含量随着吸收剂量和基质含水量的升高而显著降低, 含水率为 50% 的油炸土豆片经 3 kGy 剂量照射后, 丙烯酰胺的消解率为 56.46%; 柠檬酸、苹果酸等酸类物质能抑制丙烯酰胺的辐照消解; Na_2CO_3 、异抗坏血酸钠、芝麻酚可促进油炸土豆片中丙烯酰胺的辐照消解; 柠檬酸三钠对丙烯酰胺的辐照消解效应基本无影响。**结论** $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照可有效消解油炸土豆片中已生成的丙烯酰胺, Na_2CO_3 、异抗坏血酸钠、芝麻酚可以作为丙烯酰胺的辐照增效剂。

关键词: 丙烯酰胺; $^{60}\text{Co}-\gamma$; 辐照; 消解; 添加剂

中图分类号: TS215 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)17-0020-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.004

Effect of Irradiation Degradation of Acrylamide in Fried Potato Chips

CUI Long¹, WANG Qian-qian^{1,2}, WANG Xian¹, XU Bo¹, DONG Wei-jie¹,
CHEN Yun-tang¹, SHI Xiao-hua²

(1.The Isotope Institute Co., Ltd., Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450015, China;

2.Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the irradiation degradation law of acrylamide in fried potato chips and the effects of water content and additives on its irradiation effect, and discuss the degradation technology of acrylamide in starch food. $^{60}\text{Co}-\gamma$ was used to irradiate fried potato chips. The law of effects of absorbed dose, water content, citric acid, malic acid, Na_2CO_3 , trisodium citrate, sodium isoascorbate and sesamol, etc. on the variation of acrylamide content with the absorbed dose was studied. The results showed that, the content of acrylamide decreased significantly with the increase of absorbed dose and matrix water content. The degradation rate of acrylamide in fried potato chips with 50% water content was 56.46% at the dose of 3 kGy irradiation. The irradiation degradation of acrylamide with citric acid and malic acid was inhibited. Accordingly, the addition of Na_2CO_3 , sodium isoascorbate and sesamol could promote the irradiation degradation of acrylamide in fried potato chips. The addition of trisodium citrate had little effect on the irradiation degradation of acrylamide. $^{60}\text{Co}-\gamma$ irradiation can effectively degrade acrylamide in fried potato chips. Na_2CO_3 , sodium isoascorbate and sesamol can be used as irradiation synergist.

KEY WORDS: acrylamide; $^{60}\text{Co}-\gamma$; irradiation; degradation; additive

收稿日期: 2019-05-09

基金项目: 河南省科技开放合作计划 (182106000046); 河南省科学院基本科研业务专项资助项目 (190604014)

作者简介: 崔龙 (1985—), 男, 助理研究员, 主要研究方向为食品化学。

通信作者: 陈云堂 (1963—), 男, 研究员, 主要研究方向为农产品辐照保鲜与加工; 石晓华 (1978—), 女, 郑州大学副教授, 主要研究方向为有机合成与分离。

淀粉类农产品是人类赖以生存的物质基础,以谷类及薯类淀粉为原料制得的油条、薯条、面包、饼干等油炸烘焙类食品在我国居民饮食结构中占有较大比重,深受人们喜爱^[1]。淀粉类食品中含有的丙烯酰胺,因具有神经毒性、生殖毒性、遗传毒性,以及与甲状腺癌、肾上腺癌、乳腺癌和生殖系统癌症等的发病率存在剂量依赖关系^[2-3],被国际癌症研究机构(IARC)列为 2B 类“人类可能的致癌物”^[4]。谷物、薯类等淀粉类食品加工前的丙烯酰胺含量较少,均值在 0.1 mg/kg 以下,热加工过程促进了其生成,经烘焙、高温油炸后丙烯酰胺含量增加幅度达到 3~8 倍,最高可达 50 倍以上^[5]。据统计^[6]薯类油炸食品、谷物类油炸食品、谷物类烘烤食品中丙烯酰胺最高含量可达 3.21, 1.31, 0.59 mg/kg。我国卫生部公布的《食品中丙烯酰胺的危险性评估》报告中^[7],提醒居民减少淀粉类油炸食品的摄入量,且应改变吃油炸、焙烤和高脂肪食品为主的饮食习惯。研究建立丙烯酰胺的消解技术,对保障农产品热加工后的食用安全性和农产品热加工过程工艺的发展具有重要意义。

自从 2002 年瑞典科学家 Bachmann^[8]在油炸和焙烤淀粉类食品中发现大量丙烯酰胺(Acrylamide)以来,国内外学者对控制丙烯酰胺的含量做了大量研究。目前研究的重点是如何抑制丙烯酰胺的生成,根据丙烯酰胺形成机理,抑制手段主要集中在控制食品原料中天冬酰胺^[9-11]和还原糖的含量^[12-13]、控制加工过程中工艺条件^[14-16]、添加抑制剂^[17-21]等几个方面。总体来说,通过控制热加工过程中美拉德反应及添加抑制剂等手段抑制丙烯酰胺生成的思路具有较大局限性,其不仅会大幅度提高产品成本,同时也可能改变食品成分和风味,目前尚未对工业化生产带来实质性影响。著名的“咖啡致癌事件”经 8 年的诉讼后,2018 年 5 月美国加州法院最终裁定,仅要求星巴克和绿山等数十家咖啡企业以标签形式告知消费者咖啡中含有可能致癌物质^[22],而非限制其含量,这也从侧面反映出抑制丙烯酰胺的生成技术目前不能有效解决这一难题。综上所述,研究淀粉类热加工工艺,开发消除已生成的丙烯酰胺消解新技术至关重要,这也是当前控制丙烯酰胺含量,推动淀粉食品热加工工艺发展的必然趋势。

前期研究表明,辐照可以有效降解水溶液中的丙烯酰胺,生成无毒的聚丙烯酰胺,在此基础上文中采用⁶⁰Co- γ 对油炸土豆片进行辐照处理,探究淀粉类热加工食品基质中丙烯酰胺含量随吸收剂量及含水量的变化规律,同时选取柠檬酸、苹果酸、柠檬酸三钠、Na₂CO₃、异抗坏血酸钠、芝麻酚等常用食品添加剂,探讨酸/碱、氧化/抗氧化剂等对丙烯酰胺辐照消解效应的影响。研究旨在开发淀粉类农产品控制丙烯酰胺的热加工新工艺,提高其食用安全性,推动农产品加

工产业的发展。

1 实验

1.1 材料

实验材料主要有新鲜马铃薯(荷兰 7 号);食用油(鲁花 5S 压榨一级花生油),购于河南郑州农贸市场。

1.2 试剂

实验试剂主要有丙烯酰胺、异抗坏血酸钠、芝麻酚、柠檬酸、苹果酸、柠檬酸三钠、Na₂CO₃、甲醇,均为分析纯。

1.3 仪器与设备

仪器主要有 Agilent's 7963 液相色谱仪,美国安捷伦科技公司;DHG 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;YN-ZD-2 型电热蒸馏水器,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;AL204 分析天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;FW 型高速万能粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司。

1.4 方法

1.4.1 样品制备

取新鲜市售马铃薯,去皮洗净后切成尺寸为 0.5 cm×5 cm×5 cm 的薄片,在 180 °C 下油炸 5 min 至金黄色。经烘干、粉碎混合均匀后,测定丙烯酰胺含量。各取样品 100 g,分别喷洒 10, 20, 30, 40, 50 mL 蒸馏水,控制含水率分别为 10%, 20%, 30%, 40%, 50%;各取样品 100 g,喷洒浓度分别为 0.1, 1, 10 mmol/L 的柠檬酸、苹果酸、柠檬酸三钠、Na₂CO₃、异抗坏血酸钠、芝麻酚水溶液 40 mL,控制样品含水率为 40%,辐照处理。

1.4.2 辐照处理

样品采用河南省科学院同位素研究所有限责任公司的钴源装置进行静态辐照处理,设计剂量为 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 kGy 等 8 个处理等级,每个剂量重复 3 次,使用计量片跟踪吸收剂量。

1.4.3 含量分析

辐照后的样品在 40 °C 下干燥 12 h,称取 10 g 加入 5 mL 甲醇和 5 mL 蒸馏水,超声 30 min 后离心,提取 3 次,随后合并提取液;使用 20 mL 正己烷对提取液脱脂 3 次,经 0.45 μ m 有机滤膜过滤后采用 Agilent's 7963 液相色谱仪分析。分析条件:色谱柱为 Atlantis dC18(30 m×0.25 mm, 0.25 μ m)柱温为 35 °C;流动相为甲醇与体积分数为 0.1%甲酸的混合物,甲醇与甲酸的体积比为 5:95;流速为 1.5 mL/min;UV

检测波长为 210 nm；进样量为 20 μL 。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 进行方差分析分析,采用 Excel 作图。

2 结果与讨论

2.1 吸收剂量对油炸土豆片中丙烯酰胺含量的影响

含水率为 40%的油炸土豆片中丙烯酰胺消解率与吸收剂量的关系见图 1。由图 1 可看出,辐照可以显著降低油炸土豆片中丙烯酰胺的含量,随吸收剂量的增加,丙烯酰胺的含量逐渐降低。经 0.5 kGy 的 ^{60}Co - γ 照射后,其含量由 3129.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 显著 ($P<0.05$) 下降到 2886.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 丙烯酰胺的消解率为 7.76%; 当吸收剂量增加到 1, 1.5, 2, 2.5, 3 kGy 时, 其含量依次下降到 2645.45, 2243.92, 2045.51, 1618.94, 1466.84 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 土豆片中的丙烯酰胺降低了 484.15, 885.68, 1084.09、1510.66、1662.76 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 消解率分别为 15.47%, 28.30%, 34.64%, 48.27%, 53.13%。丙烯酰胺的含量随吸收剂量增加呈线性降低 ($R^2=0.9926$), 辐照可以有效降低丙烯酰胺的含量。丙烯酰胺含有碳碳不饱和双键, 有水分存在时, 在辐照条件下发生聚合反应生成了无毒的聚丙烯酰胺, 这与文献报道一致^[4]。

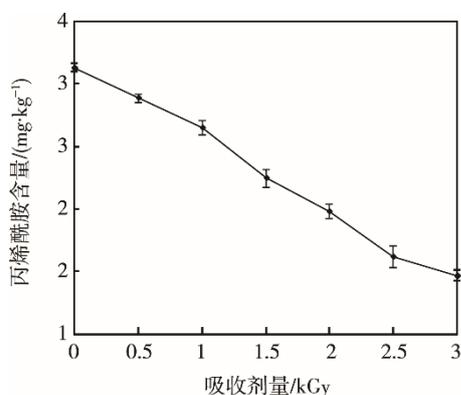


图 1 吸收剂量对丙烯酰胺含量的影响

Fig.1 Effects of absorbed dose on the content of acrylamide

2.2 含水量对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

丙烯酰胺初始含量为 3129.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的油炸土豆片经 3 kGy 的 ^{60}Co - γ 照射后, 含水量对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响见图 2, 其中 c 为油炸土豆片中丙烯酰胺的含量; c_0 为油炸土豆片中丙烯酰胺的初始含量; 消解率 = $(1 - c/c_0) \times 100\%$ 。由图 2 可知, 含水量对丙烯酰胺的降解率有显著促进作用, 随着含水量的增加, 丙烯酰胺的含量显著降低。含水率为

10%时, 经 3 kGy 的 ^{60}Co - γ 辐照后油炸土豆片中丙烯酰胺含量为 2860.77 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 其消解率为 8.59%; 当含水率升高至 20%时, 在相同的辐照条件下, 丙烯酰胺含量降低 ($P<0.05$) 到 2039.87 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 其消解率 ($P<0.05$) 提高到 34.82%, 提高了 26.23%; 随着含水率进一步升高到 30%, 40%, 50%时, 丙烯酰胺含量依次降低到 1730.98, 1466.84, 1362.63 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 其消解率依次提高到 44.69%, 53.13%, 56.46%。提高含水量能显著促进丙烯酰胺的辐照消解率, 这可能与丙烯酰胺在辐照条件下发生的聚合反应受自由基含量所影响。辐照条件下油炸土豆片中的水分子被电离, 生成水合电子、氢氧自由基以及氢自由基, 进而引发了聚合反应。在吸收剂量一定的前提下, 自由基的生成量与含水量线性相关。图 2 中 $-\ln(c/c_0)$ 与含水量呈线性关系 ($R^2=0.984$), 含水量对丙烯酰胺的辐照消解符合一级动力学模型, 侧面反应了含水量是通过辐照产生的自由基数量影响丙烯酰胺的聚合反应。

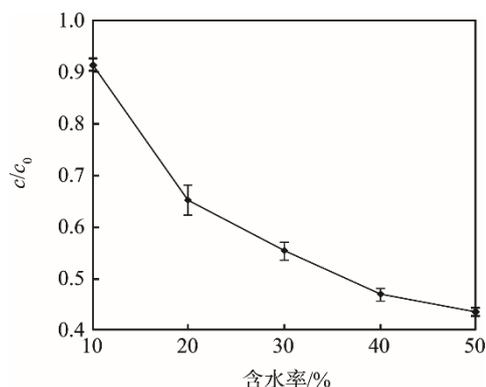


图 2 含水量对丙烯酰胺辐照效应的影响

Fig.2 Effects of water content on irradiation effect of acrylamide

2.3 添加剂对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

尽管辐照可显著降低油炸土豆片中的丙烯酰胺的含量, 但辐照对低含水量的食品基质中丙烯酰胺的消解率不高。含水率为 10%的油炸土豆片在吸收剂量为 3 kGy 的辐照后降解率仅为 8.59%, 为此添加一定量的柠檬酸、苹果酸、 Na_2CO_3 、柠檬酸三钠、异抗坏血酸钠、芝麻酚等, 探究酸碱、氧化性和抗氧化性食品添加剂对丙烯酰胺辐照降解规律的影响, 旨在探索提高低含水量食品基质中丙烯酰胺辐照消解率。

2.3.1 柠檬酸对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

柠檬酸对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响见图 3。由图 3 可知, 添加柠檬酸抑制了辐照消解效果, 低浓度的柠檬酸对丙烯酰胺的消解效应影响不显著, 高浓度的柠檬酸有显著抑制作用。含水率为

40%的油炸土豆片经 0.5 kGy 的 γ 照射处理，再添加 0.1, 1, 10 mmol/kg 柠檬酸后，丙烯酰胺的消解率由对照组的 7.76% 分别下降至 6.81%, 5.15%, 3.09%；随着吸收剂量的增加，不同浓度柠檬酸对丙烯酰胺的辐照效应影响规律与 0.5 kGy 下基本一致，添加柠檬酸对丙烯酰胺的辐照效应起抑制作用，且浓度越高对丙烯酰胺的辐照消解效应抑制作用越显著；吸收剂量为 1.5, 2.5, 3 kGy 时，添加 0.1 mmol/kg 柠檬酸组的丙烯酰胺消解率与对照组的 28.30%, 48.27%, 53.13% 相比略有提高，分别为 29.76%, 49.46%, 56.37%，提高效果不显著 ($P > 0.05$)。

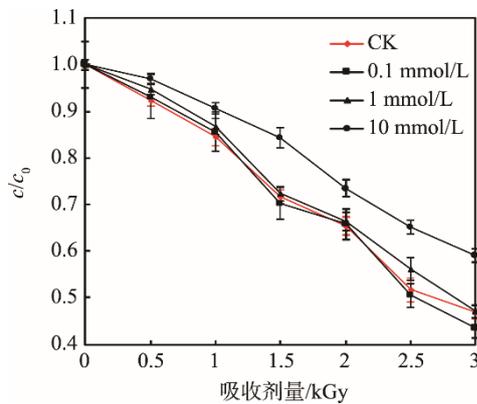


图 3 柠檬酸对丙烯酰胺辐照效应的影响

Fig.3 Effects of citric acid on irradiation effect of acrylamide

2.3.2 苹果酸对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

苹果酸对含水率为 40%的油炸土豆片丙烯酰胺辐照效应的影响见图 4。由图 4 可知，低吸收剂量下低浓度苹果酸可促进丙烯酰胺的辐照消解，高浓度和高吸收剂量下添加苹果酸则会抑制丙烯酰胺辐照消解。当吸收剂量为 0.5 kGy 时，添加 0.1, 1, 10 mmol/kg 的苹果酸，丙烯酰胺的降解率分别为 9.76%, 8.37%, 3.67%。与空白组的 7.76% 相比，0.1, 1 mmol/kg 苹果酸组促进了丙烯酰胺的消解，但促进作用不显著 ($P > 0.05$)，相比之下 10 mmol/kg 苹果酸组的抑制作

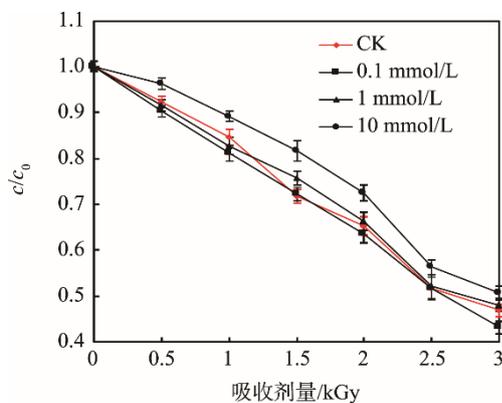


图 4 苹果酸对丙烯酰胺辐照效应的影响

Fig.4 Effect of malic acid on the irradiation effect of acrylamide

用显著 ($P < 0.05$)；当吸收剂量为 1 kGy 时，不同浓度苹果酸对丙烯酰胺辐照效应的影响规律与 0.5 kGy 下一致；继续提高吸收剂量时，添加 0.1, 1 mmol/kg 苹果酸的影响不显著，10 mmol/kg 苹果酸仍保持对辐照消解的显著抑制作用。总体来说，苹果酸与柠檬酸对油炸土豆片中丙烯酰胺的辐照效应影响规律一致，整体呈抑制作用随添加量的增加抑制效果越显著，这可能与酸性物质在辐照条件下产生氢自由基有关。丙烯酰胺的辐照消解为自由基聚合反应，氢自由基与丙烯酰胺自由基活性中心相互作用引发了链终止反应^[23]，表现出抑制作用。

2.3.3 Na₂CO₃对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

Na₂CO₃对含水率为 40%的油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响见图 5。由图 5 可知，Na₂CO₃的加入对丙烯酰胺辐照消解整体呈促进作用，加入量越高促进作用越显著。经 0.5 kGy 的 γ 射线辐照后，添加 0.1, 1, 10 mmol/kg 的 Na₂CO₃ 后，油炸土豆片中丙烯酰胺的含量由对照组的 2662.73 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 下降到 2624.05, 2592.29, 2444.49 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，其降解率由 7.76% 提高到 9.10%, 10.20%, 15.32%，均促进了丙烯酰胺的辐照消解，其中 1, 10 mmol/kg Na₂CO₃ 组促进作用达到了显著水平 ($P < 0.05$)；当吸收剂量小于 2 kGy 时，Na₂CO₃ 的影响规律与 0.5 kGy 时基本一致，不同浓度下均会促进丙烯酰胺的辐照消解。随着吸收剂量继续提高至 2.5 kGy 以上时，低浓度的 Na₂CO₃ 虽呈现出抑制作用，但抑制作用均不显著 ($P > 0.05$)；当吸收剂量为 3 kGy 时，添加 10 mmol/kg 的 Na₂CO₃ 后丙烯酰胺的含量由初始 3129.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 显著 ($P < 0.05$) 下降至 1275.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，消解率显著提高 ($P < 0.05$) 至 59.26%。由此可见，Na₂CO₃ 的加入可以有效地提高丙烯酰胺的辐照消解率，其促进作用随 Na₂CO₃ 添加量增加而增强。如前所述，酸性物质因辐照下生成氢自由基，引发了链终止反应而抑制丙烯酰胺的辐照消

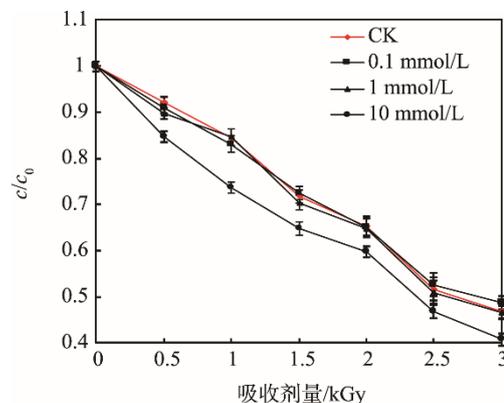


图 5 Na₂CO₃对丙烯酰胺辐照效应的影响

Fig.5 Effects of Na₂CO₃ on the irradiation effect of acrylamide

解,碱类物质则因清除氢自由基而表现出了促进其辐照消解的效果。

2.3.4 柠檬酸三钠对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

柠檬酸三钠对含水率为40%的油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响见图6。由图6可知,添加柠檬酸三钠对丙烯酰胺的辐照效应基本无显著影响。当吸收剂量为0.5 kGy时,添加0.1, 1, 10 mmol/kg的柠檬酸三钠,丙烯酰胺的消解率分别为7.93%, 6.89%, 8.21%,与对照组的7.76%相比,丙烯酰胺降解率无显著变化($P>0.05$);随着吸收剂量的提高,不同浓度的柠檬酸三钠对丙烯酰胺辐照效应的影响与0.5 kGy组一致。综上所述,在实验设定的添加剂含量及选取的吸收剂量下,柠檬酸三钠对食品基质丙烯酰胺辐照效应无显著影响。

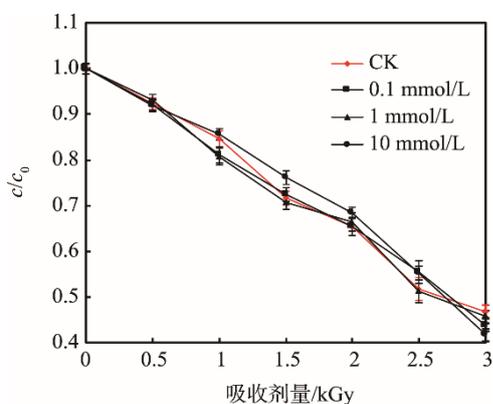


图6 柠檬酸三钠对丙烯酰胺辐照效应的影响

Fig.6 Effects of trisodium citrate on the irradiation effect of acrylamide

2.3.5 异抗坏血酸钠对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

异抗坏血酸钠对含水率为40%的油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响见图7。由图7可知,低浓度的异抗坏血酸钠对油炸土豆片中丙烯酰胺的辐照效应无显著影响,高浓度下可促进丙烯酰胺的辐照消解,促进作用随浓度的升高逐渐增强。在不同吸收剂量下,添加0.1 mmol/kg的异抗坏血酸钠时,丙烯酰胺的含量基本无变化,仅当吸收剂量为1.5 kGy时,其消解率由对照组的28.30%降低到27.61%;添加1 mmol/kg的异抗坏血酸钠时,经辐照处理后丙烯酰胺的消解率均有所提高,但没达到显著水平($P>0.05$);添加10 mmol/kg的异抗坏血酸钠时,经0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 kGy的 γ 射线处理后,丙烯酰胺的降解率由对照组的7.76%, 15.47%, 28.30%, 34.64%, 48.27%, 53.13%分别显著($P<0.05$)提高至13.56%, 20.34%, 37.69%, 43.90%, 55.61%, 61.00%。综上所述,异抗坏血酸钠可以作为食品基质下丙烯酰

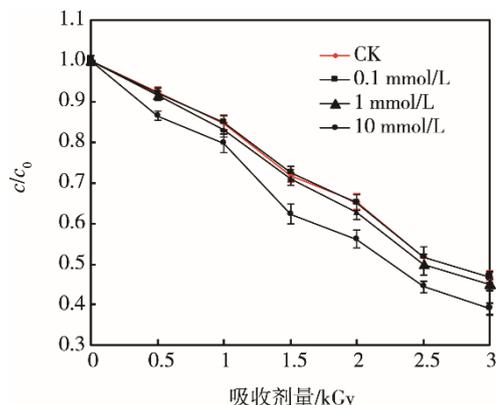


图7 异抗坏血酸钠对丙烯酰胺辐照效应的影响

Fig.7 Effects of sodium isascorbate on the irradiation effect of acrylamide

胺辐照消除的增效剂。

2.3.6 芝麻酚对油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响

芝麻酚对含水率为40%的油炸土豆片中丙烯酰胺辐照效应的影响见图8。由图8可知,芝麻酚对丙烯酰胺辐照降解效应的影响有促进作用,且促进效果随添加芝麻酚含量的增加而增强。添加0.1, 1, 10 mmol/kg芝麻酚时,经0.5 kGy的 γ 射线辐照后,油炸土豆片中丙烯酰胺的含量由对照组的2886.74 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 下降到2876.10, 2741.53, 2523.71 $\mu\text{g}/\text{kg}$,其消解率由7.76%提高到8.10%, 12.40%, 19.36%,增加芝麻酚的量显著提高了丙烯酰胺辐照消解率;当吸收剂量为3 kGy时,添加10 mmol/kg的芝麻酚后丙烯酰胺的含量由初始3129.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 显著($P<0.05$)下降至1236.51 $\mu\text{g}/\text{kg}$,与对照组的消解率(53.13%)相比,显著提高($P<0.05$)至60.49%。综上所述,添加芝麻酚可以提高丙烯酰胺的辐照消解,其促进作用随添加量的增加而增强,这与芝麻酚含有性质活泼的羟基基团有关,辐照条件下与丙烯酰胺发生了共聚,促进了丙烯酰胺的辐照消解。

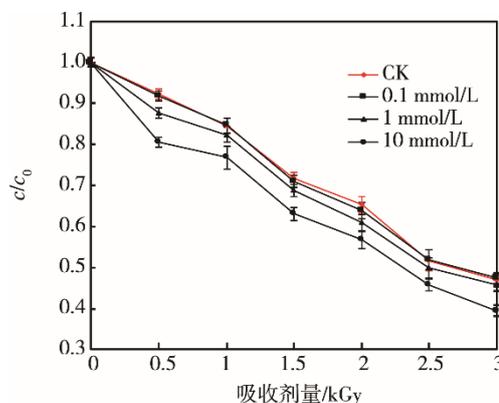


图8 芝麻酚对丙烯酰胺辐照效应的影响

Fig.8 Effects of sesamol on the irradiation effect of acrylamide

3 结语

辐照消解油炸土豆片中丙烯酰胺是利用 ^{60}Co 衰变产生的 γ 射线处理淀粉类热加工食品,通过辐照过程中基质水分产生的自由基诱导丙烯酰胺发生聚合反应生成无毒的聚合物,从而达到消除基质中已生成丙烯酰胺的目的。吸收剂量和基质含水量对丙烯酰胺的辐照消解效应影响较为显著, Na_2CO_3 、异抗坏血酸钠、芝麻酚可促进丙烯酰胺的辐照消解,添加芝麻酚后丙烯酰胺的消解率最高为60.49%。此研究从增加丙烯酰胺分子量的角度考虑,使用较为成熟的辐照技术聚合消除已生成的丙烯酰胺,不仅对食品风味无影响且成本较低,是对淀粉类热加工食品中丙烯酰胺控制方法体系的补充,可为淀粉类农产品热加工后控制丙烯酰胺的含量提供理论基础。

参考文献:

- [1] 杜冰冰,徐振辉.油炸食品的健康食用[J].肉类研究,2008(9):56—58.
DU Bing-bing, XU Zhen-hui. Healthy Eating of Fried Food[J]. Meat Research, 2008(9): 56—58.
- [2] 李治伟,罗美庄,许瓴捷,等.食品污染物丙烯酰胺毒性及其作用机制研究进展[J].中国酿造,2018,316(6):23—27.
LI Zhi-wei, LUO Mei-zhuang, XU Ling-jie, et al. Research Progress of Toxicity and Mechanism of Acrylamide in Food Contaminants[J]. China Brewing, 2018, 316(6): 23—27.
- [3] YANG H J, LEE S H, JIN Y, et al. Toxicological Effects of Acrylamide on Rat Testicular Gene Expression Profile[J]. Reproductive Toxicology, 2005, 19(4): 527—534.
- [4] 王倩倩,许勃,董威杰,等.丙烯酰胺水溶液的辐照消减效应研究[J].食品安全质量检测学报,2018,9(21):139—145.
WANG Qian-qian, XU Bo, DONG Wei-jie, et al. Study on Irradiation Reduction Effect of Acrylamide Aqueous Solution[J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2018, 9(21): 139—145.
- [5] 林流丹,黄才欢,欧仕益.食品中丙烯酰胺形成机理的研究进展[J].现代食品科技,2006,22(1):168—170.
LIN Liu-dan, HUANG Cai-huan, OU Shi-yi. The Mechanisms of Formation of Acrylamide[J]. Modern Food Science and Technology, 2006, 22(1): 168—170.
- [6] 章宇.生物黄酮抑制食品中丙烯酰胺形成的机理及其构效关系研究[D].杭州:浙江大学,2008.
ZHANG Yu. Studies on Reduction Mechanism and Structure-activity Relationship of Acrylamide in Foods by Bio-flavonoids[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [7] 高仰山.慎吃油炸烧烤食物[J].中国保健营养,2005(11):1.
GAO Yang-shan. Eat Fried Barbecue Food Cautiously[J]. Chinese Journal of Health Care Nutrition, 2005(11): 1.
- [8] BACHMANN M, MYERS J E, BEZUIDENHOUT B N. Acrylamide Monomer and Peripheral Neuropathy in Chemical Workers[J]. American Journal of Industrial Medicine, 1992, 21(2): 217—222.
- [9] PEDRESCHI F, KAACK K, GRANBY K. Reduction of Acrylamide Formation in Potato Slices during Frying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(6): 679—685.
- [10] CLAUS A, MONGILI M, WEISZ G, et al. Impact of Formulation and Technological Factors on the Acrylamide Content of Wheat Bread and Bread Rolls[J]. Journal of Cereal Science, 2008, 7(3): 546—554.
- [11] 何秀丽,谭兴和,王燕,等.低含量丙烯酰胺的油炸马铃薯片加工工艺研究[J].食品工业科技,2007,28(6):169—173.
HE Xiu-li, TAN Xing-he, WANG Yan, et al. Study on the Processing of Frying Potato Chips with Low Acrylamide Content[J]. Science and Technology of Food Industry, 2007, 28(6): 169—173.
- [12] MUTTUCUMARU N, HALFORD N G, Elmore J S, et al. Formation of High Levels of Acrylamide during the Processing of Flour Derived from Sulfate-deprived Wheat[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(23): 8951—8955.
- [13] YAYLAYAN V A, WNOROWSKI A, PEREZ L C. Why Asparagine Needs Carbohydrates to Generate Acrylamide[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(6): 1753—1757.
- [14] GRANDA C, MOREIRA R G, TICHY S E. Reduction of Acrylamide Formation in Potato Chips by Low-temperature Vacuum Frying[J]. Journal of Food Science, 2010, 69(8): 405—411.
- [15] 黄海智,盛华栋,李红艳,等.包装纸中丙烯酰胺及芳香胺迁移量的检测研究[J].包装工程,2018,39(13):27—31.
HUANG Hai-zhi, SHENG Hua-dong, LI Hong-yan, et al. Migration Detection of Acrylamide and Aromatic Amines in Packaging Paper[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(13): 27—31.
- [16] 汪丽萍,刘明,谭斌,等.工艺参数对挤压即食食品中丙烯酰胺形成的影响[J].粮食与食品工业,2011,18(2):12—16.
WANG Li-ping, LIU Ming, TAN Bin, et al. Effect of Process Parameters on Acrylamide Content in Extruded Instant Food[J]. Cereal and Food Industry, 2011, 18(2): 12—16.
- [17] 李亚丽,刘晓徐,逢世峰,等.中药材及食品中丙烯酰胺的检测及抑制方法的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2016,7(7):2809—2814.

- LI Ya-li, LIU Xiao-xu, PANG Shi-feng, et al. Research Progress on Detection and Inhibition Methods of Acrylamide in Chinese Traditional Medicines and Foods[J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2016, 7(7): 2809—2814.
- [18] 周梦舟, 丁城, 关亚飞, 等. 原花青素抑制丙烯酰胺的动力学[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 123—128.
ZHOU Meng-zhou, DING Cheng, GUAN Ya-fei, et al. Inhibitory Kinetics of Acrylamide by Procyanidins[J]. Food Science, 2018, 39(3): 123—128.
- [19] 廖晰晰, 苏小军, 李清明, 等. 食品中丙烯酰胺形成与调控机制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(3): 206—208.
LIAO Xi-xi, SU Xiao-jun, LI Qing-ming, et al. The Study of Acrylamide Formation and Regulatory Mechanism in Food[J]. Food Research and Development, 2016, 37(3): 206—208.
- [20] 何秀丽, 谭兴和, 王燕, 等. 油炸马铃薯片中丙烯酰胺形成的影响因素的研究[J]. 食品科技, 2007(3): 54—58.
HE Xiu-li, TAN Xing-he, WANG Yan, et al. Study on Influence Factor on Acrylamide Formation during Frying of Potato Crisps[J]. Food Science and Technology, 2007(3): 54—58.
- [21] MESTDAGH F, WILDE T D, DELPORTE K, et al. Impact of Chemical Pre-treatments on the Acrylamide Formation and Sensorial Quality of Potato Crisps[J]. Food Chemistry, 2008, 106(3): 914—922.
- [22] 林秋婷. 透过剂量看星巴克“致癌”[J]. 大众科学, 2018(5): 38—39.
LIN Qiu-ting. Starbucks Carcinogenesis through Dose [J]. China Public Science, 2018(5): 38—39.
- [23] 魏哲. 非稳态体系合成聚丙烯酰胺[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
WEI Zhe. Synthesis of Polyacrylamide in Unsteady System[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2018.