

电子束辐照降解玉米中黄曲霉毒素 B₁ 及对玉米品质的影响

Effects of electron beam irradiation on the degradation of aflatoxins and
the physicochemical properties of corn

罗小虎^{1,2,3} 齐丽君^{1,2,3} 房文苗^{1,2,3} 潘丽红^{1,2,3} 王 韧^{1,2,3}
LUO Xiao-hu^{1,2,3} QI Li-jun^{1,2,3} FANG Wen-miao^{1,2,3} PAN Li-hong WANG Ren^{1,2,3}
王 莉^{1,2,3} 余晓斌⁴ 陈正行^{1,2,3}
WANG Li^{1,2,3} YU Xiao-bin⁴ CHEN Zheng-xing^{1,2,3}

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 粮食发酵工艺与技术国家工程实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 4. 江南大学生物工程学院, 江苏 无锡 214122)
(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
4. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:为考察电子束辐照对玉米中黄曲霉毒素 B₁ (aflatoxin B₁, AFB₁) 的降解效果及对玉米品质的影响, 试验选取 AFB₁ 污染的玉米为原料, 研究 0~50 kGy 剂量辐照下玉米中 AFB₁ 的降解效果, 并考察电子束辐照对玉米理化性质, 包括脂肪酸值、黏度值和色度的影响。结果表明, 随着电子束辐照剂量的升高 (5~50 kGy), 玉米中 AFB₁ 含量显著降低 (P<0.05); 当电子束辐照剂量大于 15 kGy 时, 玉米理化性质变化较明显, 其中脂肪酸值显著升高 (P<0.05), 黏度值显著下降 (P<0.05), L* 值无显著变化 (P>0.05), a*, b* 值显著下降 (P<0.05)。

关键词:黄曲霉毒素 B₁; 玉米; 电子束辐照; 降解; 品质

Abstract: To study the detoxification effect of electron beam irradiation on AFB₁ in corn, the effect of electron beam irradiation on the AFB₁-contaminated corn based on the doses of 0~50 kGy was

studied. Physicochemical properties including fatty acid, color and viscosity of AFB₁-contaminated corn at different irradiated doses were also investigated. Results indicated that AFB₁ in corn significantly decreased with the irradiation dose (P<0.05). Moreover, physicochemical properties changed significantly when the irradiation dose was over 15 kGy, including the significant increase of fatty acid value (P<0.05) and the decrease of the viscosities (P<0.05). It was found that the whiteness didn't change significantly (P>0.05), while the significantly decreased redness and yellowness (P<0.05) were observed.

Keywords: Aflatoxin B₁; corn; electron beam irradiation; degradation; quality

在全球三大谷物之中, 玉米产量居首位, 约占 35% 左右。玉米作为中国重要的粮食作物之一, 在中国国民经济中的地位极为重要, 其平均年产量 (约 2.0 亿 t) 已居于世界第二, 且随着逐年增长的消费量, 玉米的加工技术、储藏技术也得到了快速发展^[1-2]。然而, 迄今为止, 玉米在生长、运输、加工和贮藏过程中, 仍易受到虫害和真菌毒素的侵染, 其安全性一直是关注的重点。

黄曲霉毒素 (AFs) 主要是由黄曲霉 (*Aspergillus flavus*) 和寄生曲霉 (*Aspergillus parasiticus*) 产生的一类有毒次级代谢产物的总称, 常污染玉米、花生、大豆等粮油原料及其制品, 这其中尤以黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁) 毒性最大、污染范围最广、对人类健康危害最为严重^[3]。尽管随着加工、储藏技术

基金项目:公益性行业 (粮食) 科研专项 (编号: 201313005, 201513006); 公益性行业 (农业) 科研专项 (编号: 201203037); 国家自然科学基金 (编号: 31371874, 31501579); 国家国际科技合作专项 (编号: 2015DFA30540); 江苏省博士后基金 (编号: 1501078B); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (编号: JUSRP11510)

作者简介:罗小虎, 男, 江南大学副教授, 博士。

通讯作者:陈正行 (1960—), 男, 江南大学教授, 博士, 博士生导师。

E-mail: zxchen_2008@126.com

收稿日期:2016-05-27

的提高,但迄今仍很难避免 AFB₁ 的污染。因此,如何有效降解玉米中 AFB₁ 已成为近年来研究的热点和难点。

AFB₁ 化学性质稳定,传统加工方式很难将其降解或去除^[3]。当前,AFB₁ 的降解方法主要有加热法^[4]、吸附法^[5]等物理法和氧化法^[6]、碱法^[7]等化学法以及生物法^[8]。由于破坏 AFB₁ 结构需要 268 °C 以上温度,能耗高且对原料中营养物质破坏很大,因此加热法实际很少应用。常用吸附剂有硅铝酸盐、活性炭等,近几年,改性吸附剂也逐步研究,但是使用吸附剂并不能消除 AFB₁ 毒性,而且在吸附原料中 AFB₁ 的同时,也可能吸附原料中的营养物质从而降低营养素的利用率,更为关键的是,吸附的毒素有可能在动物体内代谢过程中重新释放,因此其应用效果还有待进一步研究。氧化法中常用的有次氯酸钠、臭氧、过氧化氢等,这些方法虽然效果明显,但原料中维生素等营养成分破坏严重。碱法主要有氨化法和氢氧化钠法,该法较适用于含水量较高的青贮饲料以及液态原料,不适合籽粒、饼粕等固体原料,而且处理后化学物质残留率高^[9]。因此,寻找安全有效的 AFB₁ 降解方法仍是当前研究焦点。

经过长期研究与实践证明,辐照技术是一项高效、安全的食品加工保藏方式^[10]。特别是近年来,电子束辐照逐渐应用于食品中,如食品的贮藏加工^[11]、果蔬保鲜^[12]、灭虫杀菌^[13]等领域,且已经证实对真菌毒素的降解有一定效果^[14-15]。电子束辐照技术有以下优点,在今后真菌毒素降解领域具有广泛应用前景^[16]。电子束辐照过程不需要加入试剂或药品,不会造成原料二次污染,安全性较高;辐照通常在常温常压下进行,工艺简单、效率高,原料温度变化较小,对原料品质影响小;可接受处理的原料类型较广泛,且包装后的样品也可处理。此外,与 γ 射线辐照相比,尽管电子束辐照穿透性较差,但对食品穿透力依然很强,且具有经济、操作方便、使用安全和环保等优势^[17-18]。

然而,迄今尚未见电子束辐照降解玉米中 AFB₁ 效果及 AFB₁ 降解后玉米品质改变研究。因此,本研究采用 AFB₁ 污染的玉米为原料,研究不同辐照条件下 AFB₁ 的降解效果,并考察经电子束辐照后玉米原料的脂肪酸值、黏度和颜色等理化指标的变化,评价电子束辐照对玉米品质的影响,以期为今后电子束辐照降解 AFB₁ 污染粮食提供实践参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

AFB₁ 污染玉米: AFB₁ 含量 106.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 江苏当地市场; AFB₁ 对照品: 纯度 $\geq 98.0\%$, 瑞士 Alexis 公司; 甲醇、乙腈: 色谱纯, 美国 Fisher Scientific 公司; 氮气: 江苏无锡新南气体有限公司; ZORBAX SB-C₁₈ 色谱柱: 150 mm \times 4.6 mm, 5 μm , 美国安捷伦科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电子束加速器辐照装置: AB 5.0 型, 能量 5.0 MeV, 束流 25 MA, 无锡爱邦辐照技术有限公司;

高效液相色谱仪: Agilent HPLC 1260 型, 美国安捷伦科

技有限公司;

氮气吹干仪: MD200-1 型, 杭州奥盛仪器有限公司;

超纯水制备系统: Simplicity UV 型, 法国 Millipore 公司;

高精密分光测色仪: Datacolor 600 型, 瑞士 Datacolor 公司;

快速黏度分析仪: RVA 4500 型, 澳大利亚 Newport Scientific 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 AFB₁ 标准溶液的制备和玉米样品的准备 准确称取 5 mg AFB₁ 对照品, 甲醇(色谱纯)溶解配置成 100 mg/L 的储备液, 放入 -18 °C 下保存。取一定量的储备液, 分别稀释成 5, 10, 50 mg/L 的工作液, 待用。分别取不同浓度的 AFB₁ 工作液 2 mL, 待测。将玉米籽粒按四分法取样, 200 g/份, 共 6 份, 密封于聚乙烯透明袋中, 铺平, 厚度 2~3 cm。另外, 按四分法取 200 g/份玉米籽粒 6 份, 粉碎过 40 目筛, 密封于聚乙烯透明袋中, 铺平, 厚度 2~3 cm。

1.3.2 电子束辐照处理 分别设置 0, 5, 10, 15, 20, 50 kGy 共 6 个辐照剂量, 将准备好的玉米及玉米粉放入电子束辐照设备下辐照处理 2 min。

1.3.3 玉米中 AFB₁ 的提取与检测 玉米粉碎, 过 40 目筛, 称取 25 g 置于 250 mL 具塞锥形瓶中, 加入 100 mL 乙腈—水(体积比 84:16), 45 °C 下 200 r/min 振荡提取 45 min, 结束后静置 3~5 min, 过滤, 收集滤液。

取 2 mL 滤液于 5 mL 离心管中, 50 °C 下氮气吹干。分别加入 200 μL 正己烷和 100 μL 三氟乙酸, 涡旋混合 30 s, (40 \pm 1) °C 恒温箱中衍生 30 min, 室温下氮气吹干。1 mL 水—乙腈(体积比 15:85)溶解, 涡旋混匀 30 s, 0.22 μm 有机膜过滤, 滤液至样品瓶, 待测。

高效液相色谱检测条件, 激发波长: 360 nm; 发射波长: 440 nm; 流动相: 甲醇/水(体积比 42:58); 流速: 1 mL/min; 进样量: 20 μL ; 检测时间: 20 min。

1.3.4 脂肪酸值的测定 按 GB/T 5510—2011《粮油检验 粮食、油料脂肪酸值测定》执行。

1.3.5 玉米粉质特性测定 玉米粉碎, 使用快速黏度测定仪(RVA)对每个被辐照样品进行连续检测, 并用 TCW 配套软件分析。根据玉米的水分含量, 称取一定量的玉米粉, 加入超纯水, 配置成干基为 7% 的玉米粉糊样品 28 g, 于 RVA 专用铝盒内混匀。

RVA 测定温度程序: 50 °C 保持 1 min, 以 6 °C/min 上升到 95 °C (7.5 min), 保持 5 min, 再降到 50 °C (7.5 min), 保持 2 min。起始 10 s 搅拌转速 960 r/min, 之后 1 min 内降至 160 r/min, 并保持。根据所获得的黏度变化曲线确定样品的糊化温度、峰值黏度、最低黏度和最终黏度, 并与原料相比较, 研究辐照后样品的黏度值变化。

1.3.6 色度测定 由于玉米籽粒颜色分布不均, 直接测定误差较大, 因此将玉米粉碎, 混合均匀后测定, 减少颜色误差。将过 60 目筛的玉米粉装入聚乙烯透明袋中, 平铺, 测色仪测定样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每组样品分别测定 5 次。试验数据

用均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示,采用 Origin 8.0 进行单因素方差(ANOVA)分析。

2 结果与讨论

2.1 电子束辐照降解玉米中 AFB₁ 的效果

由图 1 可知,样品中 AFB₁ 的降解率随着辐照剂量的增加显著升高($P < 0.05$)。辐照剂量为 5~15 kGy 时,AFB₁ 的降解率为 20%~40%,当辐照剂量升高到 50 kGy 时,AFB₁ 的降解率达 90%。Wang 等^[19]在研究电子束辐照对 AFB₁ 的降解效果及产物影响时发现,辐照剂量与 AFB₁ 的降解率呈正比,随着辐照剂量的增加,AFB₁ 的降解率也上升,这与本研究的结果是一致的。另外,本研究发现,当原料形态发生变化时,AFB₁ 的降解效果也会发生改变。在相同辐照条件下,如 15 kGy 下,玉米籽粒中的 AFB₁ 降解率为 40%,而玉米粉中 AFB₁ 降解率为 35%。此结果表明,不同形态的玉米样品中 AFB₁ 的降解效果存在显著差异($P < 0.05$)。造成这种差异的原因可能是,AFB₁ 在玉米中的污染由表及里,且主要分布在玉米籽粒的表面,当玉米粉碎后,AFB₁ 反而均匀分布在玉米粉中,导致电子束辐照剂量相同,需要辐照的样品量增大,从而使得玉米粉中 AFB₁ 的降解率小于籽粒样品。当辐照剂量为 50 kGy 时,玉米籽粒和玉米粉中 AFB₁ 含量分别为 10.64, 19.15 $\mu\text{g}/\text{kg}$,低于中国在食品中的 AFB₁ 限量标准(20 $\mu\text{g}/\text{kg}$)。Diao 等^[20]用 50 mg/L,流速 5 L/min 的臭氧处理 AFB₁ 污染花生 60 h,AFB₁ 降解率达 89.40%。虽然该研究中 AFB₁ 的降解率与本研究的较为接近,但是处理时间上,是有较大差别的。本研究认为,造成差别主要是因降解方法、不同玉米的表面特性、AFB₁ 污染程度差异,这些因素显著影响 AFB₁ 的降解效果。

2.2 电子束辐照对玉米中脂肪酸值的影响

脂肪酸值是玉米中的脂肪在脂肪酶的作用下或酸碱水解氧化的过程中产生的,是判定玉米品质的一个重要指标。脂肪酸值的变化代表玉米原料的新鲜程度,同时也代表玉米原料储存的适宜与否^[21]。由图 2 可知,和未处理原料相比,辐照处理后的玉米脂肪酸值呈上升趋势,且随着辐照剂量的增加而增加。这一现象和 Supriya 等^[22]研究电子束辐照对青刀豆中脂肪酸值的变化相同。造成这种现象的原因:① 电子束射线对玉米中脂类物质的变性作用,导致脂类分解、酸败,从

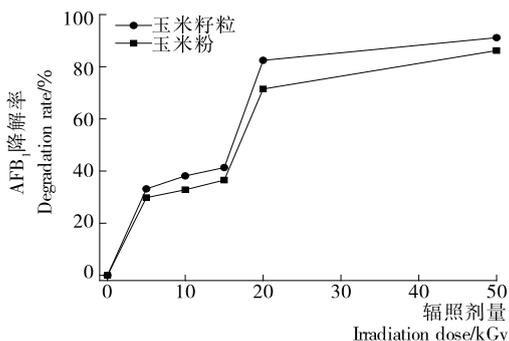


图 1 电子束辐照降解玉米中 AFB₁ 的效果

Figure 1 Effect of electron beam irradiation on degradation of AFB₁ in corn

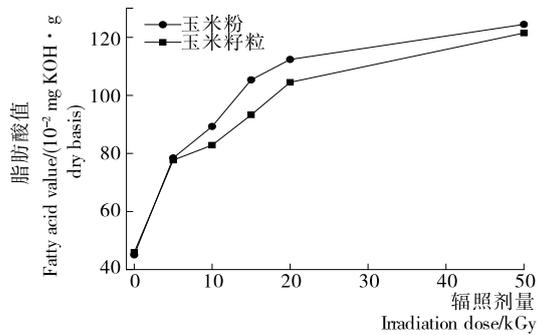


图 2 不同辐照剂量下玉米中脂肪酸值的变化

Figure 2 Effects of different irradiation dosages on fatty acid of corn

而使游离脂肪酸增加^[23-24];② 辐照过程中温度略微上升,脂肪酶在一定范围内随着温度的升高其活性也逐渐升高^[25],使得脂肪水解加速从而导致游离脂肪酸增加,造成脂肪酸值变大。根据 GB/T 20507—2015《玉米储存品质判定规则》,当辐照剂量为 5 kGy 时,玉米脂肪酸值达到轻度不宜存储($\leq 78 \text{ mg KOH}/100 \text{ g} \cdot \text{干基}$);当辐照剂量大于 10 kGy 时,玉米重度不宜存储($> 78 \text{ mg KOH}/100 \text{ g} \cdot \text{干基}$)。上述结果表明,为了保持玉米良好品质,不宜采用过高剂量辐照玉米,但要保持较高 AFB₁ 降解率,适当提高辐照剂量又是必要的,这就需要在玉米品质保持和毒素消减效率方面综合考虑,寻找一个合适的辐照条件。

2.3 电子束辐照对玉米粉糊化性质的影响

与未处理原料相比,经过电子束辐照过的玉米样品的峰值黏度、最低黏度和最高黏度都有明显的下降(见表 1)。在辐照剂量为 5 kGy 的条件下,黏度值下降了 60%;在 50 kGy 的辐照剂量下,下降了 90%。玉米淀粉的回生值在辐照处理后也有明显下降。在 5 kGy 剂量下,回生值下降了 70%;在 50 kGy 的辐照剂量下,下降了 90%。随着辐照剂量的增加,样品的糊化温度略微上升,但是上升幅度并不明显。影响玉米黏度的主要因素有内源淀粉比例、淀粉结构等^[26]。在辐照过程中,电子束会对支链淀粉长链中的碳氢键和氢氧键造成破坏,导致支链淀粉的聚合度下降,而支链淀粉的聚合度和玉米淀粉的黏度呈正相关,因此玉米淀粉的黏度也随之下降。其次,支链淀粉聚合度的下降也会使得淀粉颗粒变小且直链淀粉含量上升,直链淀粉含量越高则回生值越低,因此随着辐照剂量的增加,回生值呈明显的下降趋势^[27]。

2.4 电子束辐照对玉米色泽的影响

玉米的色泽是其一个重要的外在品质。由表 2 可知,随着辐照剂量的增加, L^* 值变化不明显(0~50 kGy), a^* 和 b^* 值最初变化不明显(0~15 kGy),但随着辐照剂量的增加,呈现显著下降趋势(20~50 kGy)。当辐照剂量达到 20 kGy 时, a^* 值下降了 35%, b^* 值下降了 14%。造成这一现象的原因主要是组成玉米黄色素的玉米黄素、叶黄素、 β -胡萝卜素、隐黄素不稳定,对辐照较为敏感^[28]。同时当辐照剂量超过 20 kGy 时,玉米样品的温度升高幅度较大,玉米色素对热不太稳定,导致色素分子发生降解,也会造成玉米色泽的变化^[29]。

表1 电子束辐照对玉米粉糊化性质的影响[†]

Table 1 Effect of electron beam irradiation on gelatinization properties in corn

辐照剂量/kGy	峰值黏度/cP	最低黏度/cP	衰减值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	糊化时间/min
0	1 290±36 ^a	673±16 ^a	617±15 ^a	1 939±22 ^a	1 266±17 ^a	4.73±0.20 ^a
5	1 026±29 ^b	303±10 ^b	723±9 ^b	592±14 ^b	289±7 ^b	3.93±0.10 ^b
10	352±12 ^c	72±7 ^c	281±10 ^c	117±6 ^c	46±5 ^c	3.87±0.10 ^b
15	168±9 ^d	37±5 ^d	131±6 ^d	72±7 ^d	35±4 ^d	4.33±0.10 ^c
20	124±7 ^e	28±6 ^d	96±7 ^e	54±8 ^e	26±2 ^e	4.20±0.20 ^{bc}
50	25±3 ^f	12±2 ^e	13±3 ^f	24±6 ^f	12±2 ^f	4.10±0.20 ^{bc}

† 同列字母不同表示组间差异显著, P<0.05。

表2 不同辐照剂量下玉米粉色度的变化[†]

Table 2 Effects of different irradiation dosages on colors of corn flour

辐照剂量/kGy	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]
0	89.73±4.13 ^a	2.92±0.12 ^a	21.65±0.12 ^a
5	89.73±3.97 ^a	2.70±0.11 ^{ab}	21.14±0.11 ^b
10	89.26±3.88 ^a	2.61±0.08 ^b	20.47±0.08 ^b
15	89.25±4.20 ^a	2.64±0.09 ^b	20.72±0.10 ^b
20	89.87±3.61 ^a	1.91±0.07 ^c	18.60±0.11 ^c
50	90.50±3.75 ^a	1.67±0.06 ^d	17.84±0.09 ^d

† 同列字母不同表示组间差异显著, P<0.05。

3 结论

本研究表明,电子束剂量在 0~50 kGy 时,可以有效降解玉米中 AFB₁。当电子束辐照剂量达 50 kGy 时, AFB₁ 降解率高于 90%,且电子束对玉米籽粒中 AFB₁ 降解效果优于玉米粉。玉米经过辐照处理后,理化性质也有较明显变化,其中脂肪酸值明显升高,玉米粉的峰值黏度、最低黏度、衰减值等均显著降低,玉米粉的 *L*^{*} 值未发生显著改变, *a*^{*}、*b*^{*} 值显著下降。对于今后采用电子束辐照降解玉米中 AFB₁, 还需进一步研究辐照后样品的安全性和质量,从而建立安全有效的辐照降解体系。

参考文献

[1] 钱永兰, 毛留喜, 周广胜. 全球主要粮食作物产量变化及其气象灾害风险评估[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 226-235.

[2] 敬珊珊, 刘晓兰, 郑喜群. 玉米蛋白加工利用研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 259-263.

[3] RODRIGUEZ VELASCO M L, CALOGNE DELSO M M, ORDONEZ ESCUDERO D. ELISA and HPLC determination of the occurrence of aflatoxin M₁ in raw cow's milk [J]. Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2003, 20(3): 276-280.

[4] RATERS M, MATISSEKR. Thermal stability of aflatoxin B₁ and ochratoxin A [J]. Mycotoxin Research, 2008, 24(3): 130-134.

[5] 李荣佳, 李治忠, 周闯, 等. 新型复合吸附剂 HG 对黄曲霉毒素 B₁ 和呕吐毒素的吸附脱毒研究[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(1): 113-119.

[6] 罗建伟, 李荣涛, 陈兰, 等. 臭氧去除粮食中黄曲霉毒素 B₁ 的方法研究[J]. 粮食储藏, 2003, 32(4): 29-33.

[7] PARKER W, MELNICK D. Absence of aflatoxin from refined vegetable oils[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1966, 43(11): 635-638.

[8] 李超波, 李文明, 杨文华, 等. 降解黄曲霉毒素微生物筛选中降解与吸附结合作用的区分[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(5): 17-21.

[9] 曹铭, 樊明涛. 黄曲霉毒素脱除技术研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 260-264.

[10] 哈益明. 辐照食品及其安全性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1-10.

[11] JOHNSON A M, REYNOLDS A E, CHEN Jin-ru, et al. Consumer acceptance of electron-beam irradiated ready-to-eat poultry meats [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2004, 28(4): 302-319.

[12] 张莹, 朱加进. 电子束辐照技术及其在食品工业中的应用研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 236-239.

[13] 贾增芹, 李克迪. 电离辐照杀菌对食品包装材料性能的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 246-250.

[14] 李萌萌, 关二旗, 卞科. ⁶⁰Co-γ 辐照对赤霉病小麦中 DON 的降解效果[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 1-5.

[15] STEFANO V D, PITONZO R, CICERO N. Mycotoxin contamination of animal feedingstuff; detoxification by gamma-irradiation and reduction of aflatoxins and ochratoxin A concentrations [J]. Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2014, 31(12): 2 034-2 039.

[16] 杨静. 农产品中真菌毒素污染辐射降解效应研究[M]. 北京: 中国农业科学院, 2009: 4.

[17] 顾可飞, 赵志辉, 高美须, 等. 电子束辐照技术在食品安全控制中的应用[J]. 中国食物与营养, 2008(3): 11-15.

[18] 杜方岭, 王守经, 胡鹏, 等. 电子束辐射技术在食品贮藏加工中的应用[J]. 农产品加工学刊, 2010, 199(2): 7-8.

[19] WANG Rui-qi, LIU Rui-jie, CHANG Ming, et al. Ultra-performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight MS for identification of electron beam from accelerator degradation products of aflatoxin B₁ [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175(3): 1 548-1 556.

(下转第 193 页)

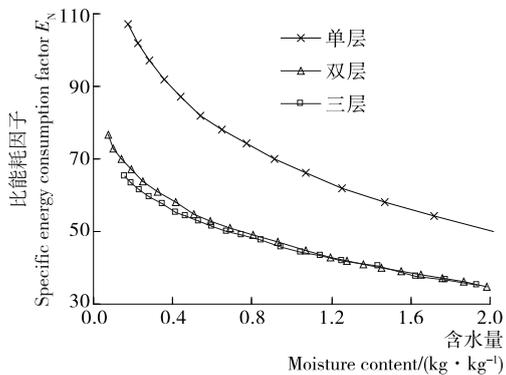


图 9 不同层数下比能消耗因子对比关系

Figure 9 Contrast relationship of specific energy consumption factor at different layers

3 结论

(1) 本试验测定了不同条件下干燥动力学曲线和理化色泽评价指标,提出了干燥比能消耗因子的评价指标,使得能量消耗对比数据化,为干燥条件优化的选择提供了客观依据。

(2) 从干燥曲线、干燥速率曲线、理化、色泽指标、比能消耗因子进行综合考察得出热风干燥黄秋葵的较优的工艺条件为:采用 80 ℃、双层物料,含水量较高时风速 1.2 m/s,湿基含水率低于 50%后降速为 0.8 m/s,并可多床合并干燥,更为高效节能。

(3) 本试验是在小试装置上完成的,而干燥过程是一个复杂的传质、传热同时进行的过程,空气湿度、风速及温度的均匀性等都会对干燥动力学规律及产品品质、能耗等产生影响,这些都是在工业化放大装置开发中应该考虑的。

参考文献

[1] 祝子坪,李娜.黄秋葵多糖含量检测方法的探索[J].江苏农业科学,2012,40(2):241-242.
 [2] 高振茂,高冠亚,杜丽红.天然佳蔬黄秋葵的营养与食用方法[J].上海蔬菜,2005(2):76-77.
 [3] TILMON R W, ROMANCHIK-CERPOVICZ J E. Feasibility of using okra exudate as a fat replacer in low fat chocolate dropped

cookies[J].Journal of the American Dietetic Association, 2001, 101(9): A-23.

[4] ROMANCHIK-CERPOVICZ J E, COSTANTINO A C, GUNN L H. Sensory evaluation ratings and melting characteristics show that okra gum is an acceptable milk-fat ingredient substitute in chocolate frozen dairy dessert [J]. Journal of the American Dietetic Association, 2006, 106(4): 594-597.
 [5] ROMANCHIK-CERPOVICZ J E, TILMON R W, BALDREE K A. Moisture retention and consumer acceptability of chocolate bar cookies prepared with okra gum as a fat ingredient substitute [J]. Journal of the American Dietetic Association, 2002, 102(9): 1301-1303.
 [6] GHORI M U, ALBA K, SMITH A M, et al. Okra extracts in pharmaceutical and food applications[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42: 342-347.
 [7] LEE C S, CHONG M F, ROBINSON J, BINNER E. Optimisation of extraction and sludge dewatering efficiencies of bio-flocculants extracted from *Abelmoschus esculentus* (okra)[J]. Environmental Management, 2015, 157: 320-325.
 [8] DOYMAZ I. Drying characteristics and kinetics of okra[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 69(3):275-279.
 [9] WANKHADEA P K, SAPKAT R S, SAPKAL V S. Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer[J]. Procedia Engineering, 2013, 51: 371-374.
 [10] 卫天业,冯耐红,侯东辉,等.黄秋葵与黄秋葵花干燥工艺研究[J].食品科学,2015(5):309-312.
 [11] 龙映均,刘四新,余敏华,等.椰果果热风干燥工艺优化研究[J].食品与机械,2011,27(4):146-148.
 [12] 夏清,陈常贵.化工原理(下)[M].天津:天津大学出版社,2005.
 [13] 周兰香,黄阿根,谢凯舟,等.化学分光光度与 HPLC 法测定荷叶总黄酮的研究[J].中草药,2002,33(1):35-37.
 [14] 盛丽,任爱梅.天然抗氧化剂茶多酚[J].化学教育,2004,25(11):8-9.
 [15] 王迪轩,何咏梅,唐春华.蔬菜的干制技术(下)[J].湖南农业,2001(11):21.
 [16] 杨玉明,王敏红,黄阿根.茶树花热风干燥工艺研究[J].扬州大学学报,2011,32(2):81-85.
 [24] 王若兰,杨延远,杨志慧.γ射线、电子束处理对玉米品质的影响[J].粮食与饲料工业,2010(3):11-13.
 [25] 吴秋明,叶兴乾,吴丹,徐黎.脂肪酶在食品工业中的应用[J].粮油加工与食品机械,2004(11):72-73.
 [26] 曾洁,李新华,高海燕.直链淀粉含量对玉米淀粉糊化性质的影响[J].沈阳农业大学学报,2006,37(5):740-743.
 [27] 于勇.γ射线辐照对稻谷小麦干燥特性及品质的影响[D].杭州:浙江大学,2006:113-121.
 [28] TOPUZ A, OZDEMIR F. Influences of gamma irradiation and storage on the capsaicinoids of sun-dried and dehydrated paprika [J]. Food Chemistry, 2004, 86(4): 509-515.
 [29] 吕欣,毛忠贵.玉米黄色素研究进展[J].粮油与油脂,2003(4):43-45.

(上接第 114 页)

[20] DIAO En-je, HOU Han-xue, CHEN Bin, et al. Ozonolysis efficiency and safety evaluation of aflatoxin B₁ in peanuts [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 55: 519-525.
 [21] SAOUSSEM H, SADOK B, HABIB K, et al. Fatty acid accumulation in the different fractions of the developing corn kernel [J]. Food Chemistry, 2010, 117(3): 432-437.
 [22] SUPRIYA P, SRIDHAR KR, NARESHKUMAR S. Impact of Electron Beam Irradiation on Fatty Acid Profile of Canavalia Seeds [J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 5(3): 1049-1060.
 [23] 罗小虎,王韧,王莉,等.臭氧处理对黄曲霉毒素 B₁ 污染玉米品质影响[J].食品科技,2015,40(9):266-271.