

# 电子束辐照对仓储烟叶菌虫害的防治效果及烟叶品质影响

王 昆<sup>1</sup> 张 琦<sup>1</sup> 徐丰卓<sup>1</sup> 李浩哲<sup>2</sup> 陈锡昊<sup>2</sup> 陈志炎<sup>2</sup> 周子健<sup>2</sup> 张祯益<sup>2</sup> 黄 江<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(武汉乐道物流有限公司 武汉 430077)

<sup>2</sup>(强电磁技术全国重点实验室 华中科技大学 武汉 430074)

**摘要** 使用200 keV和10 MeV电子加速器分别研究了电子束辐照对烟草中的烟草甲虫及细菌的杀灭效果以及对烟叶品质的影响。研究表明:通过电子束辐照可高效、快速实现烟叶内部所有菌虫的无害化,辐照后的烟叶在仓库验证中有良好的保持性,38 d内未检出任何菌落。辐照对烟叶的基本理化指标、有机酸含量及矿质元素含量无明显影响,过高能量会使烟叶中的新植二烯挥发损失,从589.91  $\mu\text{g/g}$ 降至418.64  $\mu\text{g/g}$ ,使其香气质量有一定程度降低。针对仓储烟叶的未来辐照实际应用,Fluka仿真结果表明,3 MeV能量的电子束足以穿透现有烟叶堆积密度的整箱储运烟叶。

**关键词** 仓储烟叶, 辐照灭菌, 辐照杀虫, 烟草甲虫, 烟叶质量

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2023-0087

**引用该文:**

王昆, 张琦, 徐丰卓, 等. 电子束辐照对仓储烟叶菌虫害的防治效果及烟叶品质影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(3): 030402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0087.

WANG Kun, ZHANG Qi, XU Fengzhuo, *et al.* Effects of electron-beam irradiation on the control of bacterium and insect pests in warehoused tobacco and on tobacco quality[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(3): 030402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0087.



## Effects of electron-beam irradiation on the control of bacterium and insect pests in warehoused tobacco and on tobacco quality

WANG Kun<sup>1</sup> ZHANG Qi<sup>1</sup> XU Fengzhuo<sup>1</sup> LI Haozhe<sup>2</sup> CHEN Xihao<sup>2</sup> CHEN Zhiyan<sup>2</sup>  
ZHOU Zijian<sup>2</sup> ZHANG Zhenyi<sup>2</sup> HUANG Jiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Wuhan Ledao Logistics Co., Ltd, Wuhan 430077, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**ABSTRACT** The effects of 200 keV and 10 MeV electron-irradiation accelerators on the eradication of

基金资助: 华中科技大学学术前沿青年团队计划(2019QYTD06)资助

第一作者: 王昆,男,1997年11月出生,2020年7月于河南农业大学获得学士学位,从事烟叶醇化技术与研究

通信作者: 李浩哲,工学学士,目前于华中科技大学攻读博士学位, E-mail: haozheli97@outlook.com

收稿日期: 初稿 2023-10-12; 修回 2023-11-01

Supported by Program for Huazhong University of Science and Technology Academic Frontier Youth Team (2019QYTD06)

First author: WANG Kun (male) was born in November 1997, and obtained his bachelor's degree in July 2020 from Henan Agricultural University, engaged in tobacco alcoholization technology and research

Corresponding author: LI Haozhe, bachelor of engineering degree. Now he is a doctoral student at Huazhong University of Science and Technology, E-mail: haozheli97@outlook.com

Received 12 October 2023; accepted 01 November 2023

lasioderma serricorne and bacteria in tobacco and on the quality of tobacco leaf are investigated. By controlling the parameters of electron-beam irradiation, all lasioderma serricorne and bacteria inside tobacco can be eradicated efficiently and rapidly. The irradiated tobacco exhibits good retention based on a validation experiment, and no colonies are detected within 38 d. The irradiation has no significant effects on the basic physical and chemical indexes or the organic-acid and mineral-element contents of tobacco. Excessive energy levels reduce the volatilization loss of neophytadiene in tobacco from 589.91 to 418.64  $\mu\text{g/g}$ , which indicates that the aroma quality of the tobacco deteriorates to a certain extent. Fluka simulation results show that a 3 MeV electron beam is sufficient to penetrate a full box of stored tobacco at existing tobacco stacking densities.

**KEYWORDS** Tobacco storage, Irradiation sterilization, Irradiation insecticide, Lasioderma serricorne, Tobacco quality

CLC TL99

烟草作为全球重要的非食用农产品之一,对许多国家的经济产生了深远的影响<sup>[1-2]</sup>。在中国,烟草作为实体经济的重要组成部分,在2022年纳税超过1.4万亿元,约占全国税收的8%<sup>[3]</sup>。尽管烟草创造了巨大的经济价值,全球每年仍有价值500亿美元的烟草遭受着仓储害虫和细菌的严重威胁<sup>[4]</sup>。

我国储烟害虫主要包括烟草甲虫、烟草粉螟、大谷盗及米扁虫等<sup>[5]</sup>。这些害虫一般个体较小,不易被发现且易于转移,它们对环境的适应能力和繁殖能力都很强,休眠时对环境依赖性较低,在储藏期对烟叶会造成十分严重的危害。储烟害虫不仅可以直接啃食烟叶,由害虫产生的虫尸、丝状物、虫粪等污染物也会直接降低烟叶品质,甚至使其完全丧失经济价值<sup>[6]</sup>。我国储存烟叶的直接虫损率每年约为1.64%,以2021年产量 $2.0207 \times 10^7$  t计算,烟叶损失总重量约为33 139 t,价值高达230亿元。

在防治储藏烟叶害虫方面,气调法是一种常见的物理防治策略<sup>[7]</sup>。该方法需将烟叶密封,并人工调节仓库内的气体成分,使氮气浓度提高到95%至98%,以有效控制害虫和抑制霉菌生长。在防治仓储害虫的同时,气调法需要维持极低的氧气含量,该过程需持续一段时间,一定程度上限制了其应用范围。温控法是另一种常见的防治法,其原理是利用温度变化来消灭害虫<sup>[8]</sup>,以烟草甲虫为例,当温度高于48 °C或低于-4 °C时,它可以被完全消灭。但温控法也存在一些局限性,这种方法可能会对烟叶品质产生影响<sup>[9]</sup>,因此并不适用于烟叶储存。此外,某些害虫的卵和幼虫在-13 °C下暴露2~5 d后,仍然可以在25 °C的温度下孵化<sup>[10]</sup>。

辐照灭菌杀虫是指利用电离辐射技术与害虫的相互作用所产生的化学、物理和生物效应使害虫及微生物完全丧失生物活性<sup>[11-12]</sup>。该方法无化学残

留,杀虫杀菌彻底,不产生生物抗性,受辐照物品损伤小,操作相对简单,并可对包装好的产品进行辐照处理<sup>[13]</sup>,目前电子加速器已经广泛应用于食品和水果等各个领域的杀虫灭菌中<sup>[14]</sup>。

本文以烤烟片为研究对象,使用200 keV和10 MeV的电子辐照加速器分别对烟叶中的自然菌落与模拟虫情进行灭菌杀虫实验,研究了不同辐照处理时间下对烟叶理化性质的影响,结合专业评吸与蒙特卡罗仿真模拟,探讨了电子束辐照作为一种新型灭菌杀虫手段的效果及其对烟叶品质的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及设备

受试烟叶样品取自武汉乐道物流有限公司醇化库,烟叶代码为149,为2020年产自云南省,等级为C3F的烤烟片,取样前养护方式为机械调控,取样后存放于恒温恒湿保存柜中,温度设置为10 °C,湿度设置为35%以下,每天对温湿度进行监控。模拟虫害所用受试虫体为烟草甲虫,取样自湖北中烟技术中心,取足量成虫与虫卵置于恒温恒湿培养箱中培养。

电子束辐照自屏蔽试验系统EBLab-200探究低能加速器杀灭烟草甲虫的最佳辐照处理时间,设定电子束能量为200 keV,束流为9.3 mA,调整样品仓移动速度以调整辐照处理时间。使用武汉爱邦高能技术有限公司的AB10.0工业电子辐照加速器验证高能电子束辐照灭菌杀虫效果,电子束能量设定为10 MeV,束流设定为5.4 mA,调整载物小车线速度以调整辐照处理时间。辐照处理时间指样品整体通过电子束下的时间,在EBLab-200进行辐照时以设备自身计算的表面剂量(Surface dose)得到烟

叶受到的辐照剂量；在AB10.0高能加速器下通过在每个样品表面及底部粘贴剂量片，并按GB/T 15053—2008<sup>[15]</sup>使用剂量片吸收剂量的标准方法进行标定而得到烟叶吸收的辐照剂量。

## 1.2 实验方法

为了评估电子束对烟草甲虫的辐照杀虫效果，在低能加速器下，分别称取1 g烟叶于90 mm培养皿，引入人工模拟的虫情，成虫每皿10头，虫卵每皿0.5 g；在高能加速器下，分别称取100 g烟叶于自封袋，引入人工模拟虫情后摇晃均匀。然后，对烟叶进行不同时间的辐照处理后检查成虫的致死情况，并施以糖水后观察，对于虫卵，将其置于适宜的环境下进行静置孵化。通过测定辐照处理后的成虫致死率和虫卵孵化率来评估杀虫效果。

在研究烟叶杀菌效果时，在低能加速器下称取1 g烟叶平铺于无菌袋，密封后进行辐照处理，处理时间统一为6 s，即表面剂量9 kGy；在高能加速器下，称取100 g烟叶，将其封装在无菌袋中并进行辐照处理，处理时间统一为2 s，剂量3.7 kGy。随后与未进行辐照的烟叶样品对比。采用国家标准GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》<sup>[16]</sup>对其杀菌效果进行检验，以CFU/g（每克的菌落形成单位）表示。在仓库验证阶段，将经过高能加速器辐照处理2 s的烟叶置于专门的标准仓储环境中，验证其杀虫灭菌效果的有效性。定期取样并进行检验，以验证其是否受到了菌虫的侵害。

利用蒙特卡罗仿真软件Fluka进行电子束分布仿真。其箱体尺寸及元素组成参考实际纸箱及烟草情况仿真模拟，模型采用乐道物流有限公司常用的储运纸箱规格，即京昌公司承制1 136 mm×720 mm×725 mm规格外箱，纸板厚度按1 cm计，烟叶质量按12.6 kg计，密度约为0.023 1 g/cm<sup>3</sup>，模拟电子束从箱体上方射入，概率密度分布在10<sup>-6</sup>以上判定为有效穿透。

## 1.3 理化检测及评吸分析

本研究旨在探究不同能级的电子束辐照处理对烟叶品质的影响。为了完全消灭烟草甲虫和微生物，选取了高能电子束辐照处理2 s（剂量3.7 kGy）和低能电子束辐照处理6 s（表面剂量9 kGy）的辐照

处理时间，对辐照处理和空白对照组烟叶进行常规化学成分分析，包括傅里叶红外光谱检测，pH值测定，成分含量测定（包含总氮、植物碱、总糖、还原糖、钾、氯、淀粉、蛋白质），香气质分析，有机酸含量分析，矿质元素分析等。针对感官质量评估，选取了原样和经过高能电子束处理后的烟叶，由河南中烟技术中心进行人工评吸，评价了香气质、香气量、杂气、劲头、浓度、刺激性、余味、燃烧性、灰色和质量档次等项目，最终以评分的形式表示结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 烟叶辐照杀虫灭菌效果探究

由图1分析可知，在实验室自屏蔽低能加速器条件下，辐照6 s（表面剂量9 kGy）可使烟草甲虫的成虫及虫卵完全丧失生物活性，而使用工业生产用高能加速器则仅需2 s（剂量3.7 kGy）的辐照处理即可完全杀灭烟草甲虫所有虫态。相比之下，使用200 keV加速器需要更长的辐照时间杀灭全部虫态。这可能是由于电子能量较低，所用油分色度较佳的C3F烟叶的平均厚度约为90 μm，电子束穿透烟叶深度有限，无法杀灭隐藏在培养皿底部的烟草甲虫。

电子束辐照在灭杀烟草甲虫方面表现出极高的效率。对于实际的烟叶储存和运输过程中的辐照灭虫，需要选择适当的加速器能量，以确保杀灭深藏在烟叶堆积内部的虫情。

由图2(a)分析可知，经辐照处理后烟叶的菌落总数随取样时间变化，在低能电子加速器6 s（表面剂量9 kGy）和高能电子加速器2 s（剂量3.7 kGy）的处理下，烟叶表面的有害细菌均可被杀灭，并且在14 d内取样食品安全国家标准微生物学检验结果均为0（未检出），图2(a)中两条代表菌落总数的曲线由此重合。

由图2(b)分析可知，在仓库验证中，无外来菌种污染的情况下，高能电子束辐照处理2 s的烟叶能在38 d内保持无菌状态，综上所述，电子束辐照具有良好的灭菌效果。需要注意的是，尽管低能和高能加速器都具有有效杀灭细菌的能力，但由于电子能量和穿透深度存在差异，高能电子辐照加速器的处理能力明显优于低能加速器。

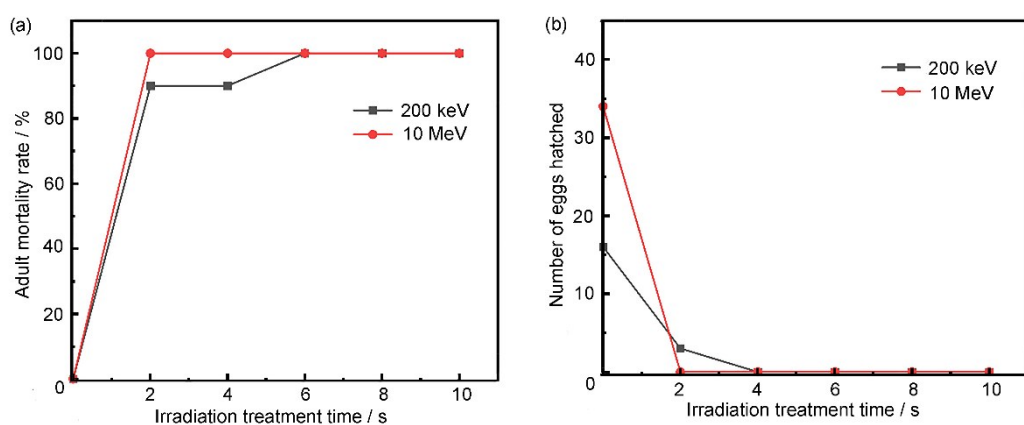


图1 烟叶辐照烟草甲虫杀灭效果:(a)成虫死亡率;(b)虫卵孵化数

Fig.1 Effects of tobacco irradiation on killing lasioderma serricorne: (a) adult mortality; (b) number of eggs hatched

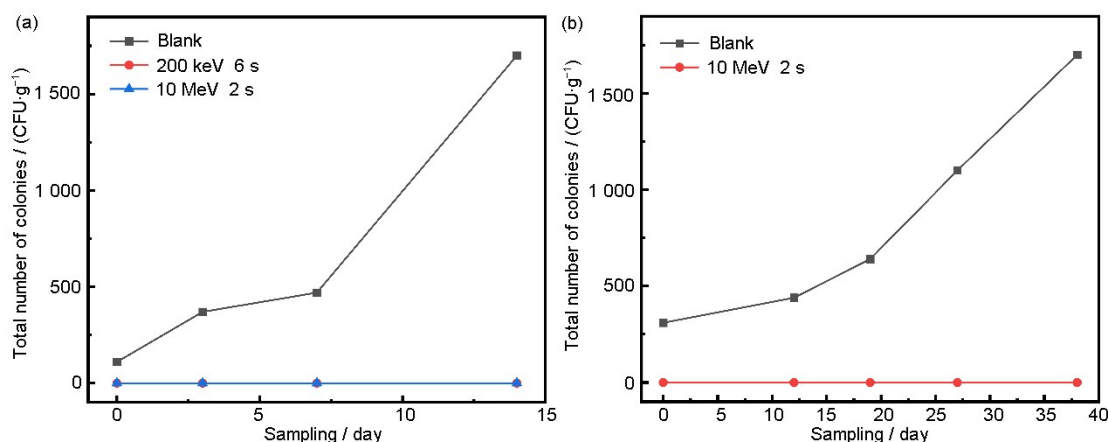


图2 烟叶辐照灭菌效果:(a)实验室验证;(b)仓库验证

Fig.2 Effects of tobacco irradiation sterilization: (a) laboratory validation; (b) warehouse validation

## 2.2 辐照对烟叶品质的影响探究

由辐照前后的烟叶在傅里叶变换衰减全反射红外光谱(ATR-FTIR)(图3)中分析可知,3 300 cm<sup>-1</sup>处的宽峰代表烟叶中含有糖类物质以及羧酸类物质的O-H伸缩振动峰;2 920 cm<sup>-1</sup>及2 850 cm<sup>-1</sup>处的尖峰代表C-H伸缩振动峰代表烟叶中存在亚甲基、甲基类物质;1 730 cm<sup>-1</sup>处的C=O伸缩振动峰1 250 cm<sup>-1</sup>处的N-H伸缩振动峰同样证明了烟叶中存在的蛋白质类、糖类物质,1 050 cm<sup>-1</sup>、820 cm<sup>-1</sup>、780 cm<sup>-1</sup>处的峰指示了烟叶中存在的淀粉类物质<sup>[17]</sup>。不同能级的电子束辐照前后的烟叶红外谱图未见较大变化,1 515 cm<sup>-1</sup>及1 365 cm<sup>-1</sup>处的尖峰随着辐照能量的升高有所减弱,指示了烟叶中的酰胺类物质含量有所降低。

ATR-FTIR 仅能定性分析烟叶成分,为了更深入探究辐照对烟叶品质的影响,对烟叶从基本理化性质、香气成分、有机酸含量及矿质元素等指

标进行了测定。

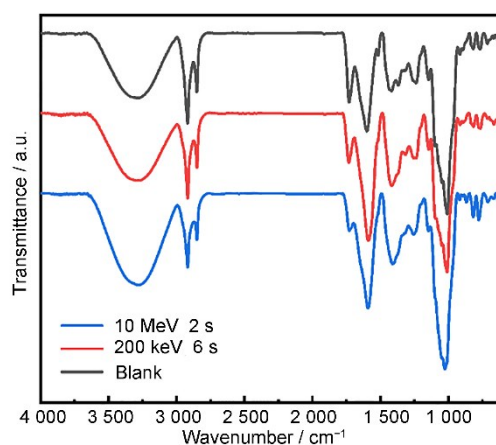


图3 辐照处理前后烟叶的傅里叶红外光谱  
(彩色见网络版)

Fig.3 ATR-FTIR spectra of tobacco leaves before and after irradiation treatment (color online)

表1列出了辐照前后烟叶的基本理化指标,辐照对烟叶的氯元素含量、钾元素含量、酸碱度及

灰分没有明显影响，而辐照后烟叶的总糖和还原糖及淀粉含量都有所提高，糖类物质在烟叶中充当骨架物质，在平衡含氮化合物，改善烟气劲头和刺激性，提高填充值、柔韧性和耐加工性方面发挥重要作用<sup>[18]</sup>。此外，辐照使得烟碱含量小幅降低，烟碱物质会影响烤烟的口感，过高与过低都会使抽吸感受下降，一般来说，高品质的烟叶中部橘黄色，油分色度较佳的C3F的烟叶平均烟碱含量在1.2%~2.8%，品质稍次烟叶中部橘黄色油分多色度浓的平均烟碱含量C1F在1.5%~3.5%之间，而低品质的上部橘黄色油分多色度浓的B2F烟叶烟碱平均含量在3.8%<sup>[19]</sup>，烟碱含量的小幅降低对烟叶的品质无较大程度的影响<sup>[20]</sup>，但高能电子辐照后烟叶的烟碱降低得更多，为保持烟叶原本的品质，应适当降低电子束能量。总的来说，辐照处理对本实验所用的烟叶基本理化性质无明显影响。

表1 辐照处理前后烟叶基本理化性质  
Table 1 Basic physical and chemical properties of tobacco before and after irradiation treatment

| 基本理化性质/%                               | 空白对照  | 200 keV | 10 MeV |
|----------------------------------------|-------|---------|--------|
| Basic physical and chemical properties | Blank | 6 s     | 2 s    |
| 总糖 Total sugar                         | 24.7  | 25.5    | 25.3   |
| 还原糖 Reducing sugar                     | 24.4  | 25.0    | 25.1   |
| 烟碱 Nicotine                            | 1.87  | 1.78    | 1.72   |
| 氯 Chlorine                             | 0.52  | 0.55    | 0.51   |
| 钾 Potassium                            | 1.96  | 1.91    | 1.86   |
| 总氮 Total nitrogen                      | 2.21  | 2.10    | 2.12   |
| 淀粉 Amylum                              | 6.20  | 7.01    | 7.01   |
| 蛋白质 Protein                            | 7.43  | 7.73    | 6.79   |
| 灰分 Ash content                         | 11.7  | 11.0    | 11.4   |

烟叶和烟气的香味是多种微量香气成分共同作用的结果<sup>[21]</sup>，不同香气成分具有不同的化学结构和性质，因而，对人的嗅觉产生不同的刺激作用，形成不同的嗅觉反应，对总体香气的量、质、型有不同的贡献<sup>[22]</sup>。从表2分析可知，辐照后的烟叶香气成分总量均发生一定程度的减少，辐照能量越高、剂量越高则减少程度越大。以下对一些特定的烟气成分进行分析，在所有的香气成分中，新植二烯是一种C20聚类异戊二烯，在烟草中性强

发物中含量最高，是烟叶中重要的致香物质<sup>[23]</sup>，新植二烯在烟草燃烧时可直接进入烟气，具有减少刺激性、醇和烟气的作用<sup>[24]</sup>。辐照后的烟叶香气成分中新植二烯含量均降低，且能量越高其降低程度越大，这可能是由于新植二烯的挥发性较强<sup>[25]</sup>，高能电子束作用于烟叶时，使其从烟叶中释放并损失。此外，烟气中的糠醛与糠醇等物质含量也有所提高，异佛尔酮及氧化异佛尔酮的从无到有，说明辐照可能使烤烟片中产生类薄荷香气味<sup>[26]</sup>。巨豆三烯酮类物质具有类似可可和白肋烟一样的宜人香味，呈现持久的甜润的烟草香、干果香和辛香底韵，其香气与烟草协调一致，对卷烟的增香提调，去除杂气有明显的作用<sup>[27]</sup>。烟叶烟气含量在辐照处理后出现了一定程度的降低，螺岩兰草酮与法尼基丙酮也出现了同样的情况。

烟叶的香气总量及个别成分发生变化，会影响香气的强度、稳定性、协调性与持久性，甚至会改变香气的类型，这些都可能影响到最终产品的质量和口感。电子束辐照会使得烤烟片的香气总量减少，其中新植二烯及多数香气物质的含量都有所降低，随着加速器能量的提高，香气量降低会更加明显。

表2 辐照处理前后烟叶香气成分  
Table 2 Aroma composition of tobacco before and after irradiation treatment

| 香气成分/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )     | 空白对照  | 200 keV | 10 MeV |
|----------------------------------------------|-------|---------|--------|
| Aroma composition                            | Blank | 6 s     | 2 s    |
| 糠醛 Furfural                                  | 15.12 | 16.26   | 15.62  |
| 糠醇 Furfuryl alcohol                          | 1.89  | 3.61    | 3.20   |
| 2-乙酰基呋喃 2-Acetylfuran                        | 0.85  | 1.03    | 1.15   |
| 苯甲醛 Benzaldehyde                             | 0.64  | 1.01    | 0.67   |
| 5-甲基糠醛 5-Methylfurfural                      | 1.89  | 1.86    | 1.78   |
| 6-甲基-5-庚烯-2-醇 6-Methyl-5-hepten-2-ol         | 0.00  | 0.00    | 0.00   |
| 6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one        | 1.51  | 1.67    | 1.64   |
| 苯甲醇 Benzyl alcohol                           | 5.88  | 5.59    | 6.07   |
| 3,4-二甲基-2,5-呋喃二酮 3,4-Dimethyl-2,5-furandione | 0.62  | 0.65    | 0.68   |
| 苯乙醛 Phenylacetaldehyde (PAG)                 | 4.71  | 4.73    | 4.80   |
| 2-乙酰吡咯 2-Acetylpyrrole                       | 2.30  | 2.10    | 2.36   |
| 愈创木酚 Guaiacol                                | 1.37  | 1.39    | 1.34   |

续表

| 香气成分 / ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )           | 空白对照   | 200 keV | 10 MeV |
|------------------------------------------------------|--------|---------|--------|
| Aroma composition                                    | Blank  | 6 s     | 2 s    |
| 芳樟醇 Linalool                                         | 0.47   | 0.66    | 0.59   |
| 苯乙醇 Phenethyl alcohol                                | 2.25   | 2.62    | 2.13   |
| 异佛尔酮 Isophorone                                      | 0.00   | 0.84    | 0.00   |
| 氧化异佛尔酮                                               | 0.27   | 0.41    | 0.31   |
| Oxidized isophorone                                  |        |         |        |
| 2,6-壬二烯醛                                             | 0.39   | 0.46    | 0.55   |
| 2,6-Nonadienal                                       |        |         |        |
| 藏花醛 Saffron aldehyde                                 | 0.00   | 0.05    | 0.05   |
| $\beta$ -环柠檬醛                                        | 0.48   | 0.52    | 0.45   |
| $\beta$ -Cyclocitraldehyde                           |        |         |        |
| 茄酮 ketone                                            | 25.45  | 22.58   | 21.96  |
| $\beta$ -大马酮                                         | 16.12  | 13.37   | 13.94  |
| $\beta$ -Damascenone                                 |        |         |        |
| $\beta$ -二氢大马酮                                       | 9.38   | 6.74    | 7.58   |
| $\beta$ -Dihydrodammarone                            |        |         |        |
| 香叶基丙酮                                                | 2.07   | 2.07    | 2.07   |
| Geranylacetone                                       |        |         |        |
| 二氢猕猴桃内酯                                              | 4.12   | 3.14    | 3.72   |
| Dihydrokiwifruit lactone                             |        |         |        |
| 巨豆三烯酮 1                                              | 3.64   | 3.42    | 3.44   |
| Soybean trienone 1                                   |        |         |        |
| 巨豆三烯酮 2                                              | 18.87  | 16.01   | 15.59  |
| Soybean trienone 2                                   |        |         |        |
| 巨豆三烯酮 3                                              | 3.14   | 2.76    | 2.53   |
| Soybean trienone 3                                   |        |         |        |
| 3-羟基- $\beta$ -二氢大马酮 3-Hydroxy-beta-dihydrodammarone | 3.54   | 2.96    | 2.93   |
| 巨豆三烯酮 4                                              | 23.47  | 19.16   | 19.32  |
| Soybean trienone 4                                   |        |         |        |
| 螺岩兰草酮                                                | 1.93   | 1.96    | 1.46   |
| Spirogyra orchid ketone                              |        |         |        |
| 法尼基丙酮                                                | 6.21   | 5.88    | 5.12   |
| Farnesyl acetone                                     |        |         |        |
| 新植二烯除外总量                                             | 158.55 | 145.51  | 143.03 |
| Excluding total amount of                            |        |         |        |
| Neophytadiene                                        |        |         |        |
| 新植二烯 Neophytadiene                                   | 589.91 | 436.45  | 418.64 |
| 总量 Overall amount                                    | 748.46 | 581.96  | 561.67 |

矿质元素是烟草生长发育所必需的元素之一，对烟叶的生长发育和产量质量有着重要的影响<sup>[28]</sup>。由表 3 分析可知，辐照前后烟叶中的 10 种矿质元素中磷元素含量有所升高，磷元素来源于烤烟中的有机磷，主要是核酸、蛋白质及糖类物质，这

与表 1 中糖类物质含量的升高相符。其他矿质元素含量在辐照前后均无明显变化，表明辐照对烟叶中的矿质元素无明显影响。

表 3 辐照处理前后烟叶矿质元素  
Table 3 Mineral elements of tobacco before and after irradiation treatment

| 矿质元素 / ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 空白对照  | 200 keV | 6 s | 10 MeV | 2 s |
|------------------------------------------|-------|---------|-----|--------|-----|
| Mineral elements                         | Blank |         |     |        |     |
| 硼 Boron                                  | 0.026 | 0.026   |     | 0.025  |     |
| 铜 Copper                                 | 0.015 | 0.016   |     | 0.019  |     |
| 铁 Iron                                   | 0.20  | 0.21    |     | 0.22   |     |
| 锰 Manganese                              | 0.15  | 0.15    |     | 0.17   |     |
| 钠 Sodium                                 | 0.10  | 0.11    |     | 0.09   |     |
| 磷 Phosphorus                             | 1.77  | 1.89    |     | 1.93   |     |
| 锌 Zinc                                   | 0.038 | 0.040   |     | 0.044  |     |
| 钙 Calcium                                | 27.1  | 26.0    |     | 26.9   |     |
| 钾 Potassium                              | 20.9  | 19.7    |     | 20.5   |     |
| 镁 Magnesium                              | 4.69  | 4.62    |     | 4.66   |     |

烟叶中的非挥发性有机酸含量变化对烟草生长过程中的生理代谢起重要作用，是三羧酸循环的中间产物，又是合成糖类、氨基酸和脂类的中间产物，直接影响烟叶及其制品的质量<sup>[29]</sup>。许多有机酸及其衍生物是烟草香味的主要成分，对于烟气的吸味口感特性而言具有积极的贡献作用<sup>[30]</sup>，并赋予烟气吸味和芳香特征。

由表 4 分析可知，烟叶在低能电子辐照加速器作用下有机酸总量有一定降低，而在高能电子辐照加速器作用下无明显变化，低能加速器辐照下发生降低的主要是丁二酸、丙二酸、柠檬酸和苹果酸，有文献表明，这几种酸是区分烟叶香型的关键指标<sup>[30]</sup>，其含量降低会引起烤烟片香气质量变化，例如苹果酸和柠檬酸等不饱和脂肪酸会增加烟气刺激性，使烟叶产生涩味。 $\gamma$ -戊酮酸和 2,4-庚二烯酸在辐照后含量有所升高，这两种物质都具有微甜的水果味和甜味<sup>[31]</sup>，其含量增加可能使烟叶的口感得到一定增加。饱和酸的含量在辐照前后无明显变化，这可能是由于其状态较为稳定<sup>[32]</sup>，在一定程度的辐照处理下不会发生较大变化。

表 5 列出了辐照前后烟叶的评吸结果，辐照后的烟叶在浓度(6.5-6.5)、柔细度(6.5-6.5)、余味(6.0-6.0)、杂气(6.0-6.0)、劲头(中-中)、燃烧性

(7.0-7.0)及灰色(7.0-7.0)特性上与未辐照的烟叶评分相当，而在香气质量(6.5~6.2)、透发性(6.5~6.3)及刺激性(6.5~6.3)上评分略低于未辐照烟叶。结合表2来看，辐照使得烟叶中的香气量从748.46 μg/g降低至561.67 μg/g，这可能是由于高能电子束辐照后烟叶中的香气物质被降解、含量变化所致。烟叶的透发性是指烟叶在燃烧时，香气物质的释放程度。透发性好的烟叶，其香气物质释放充分，烟气中的香气成分较多，口感较好，可以看出，辐照后烟叶的透发性有所降低，这也可能导致其香气质量的下降。从烟叶的整体感官分析来看，10 MeV 高能电子加速器辐照处理对烟叶香气质量略有影响，其余特性未见明显变化。

表4 辐照处理前后烟叶有机酸含量  
Table 4 Organic acid content of tobacco before and after irradiation treatment

| 有机酸 / (mg·g <sup>-1</sup> ) | 空白对照   | 200 keV | 10 MeV |
|-----------------------------|--------|---------|--------|
| Organic acid                | Blank  | 6 s     | 2 s    |
| 草酸                          | 14.27  | 14.22   | 14.24  |
| Oxalic acid                 |        |         |        |
| 丙二酸                         | 1.94   | 1.83    | 1.92   |
| Malonic acid                |        |         |        |
| γ-戊酮酸                       | 7.00   | 7.72    | 7.73   |
| γ-pentanone acid            |        |         |        |
| 丁二酸                         | 3.34   | 2.73    | 2.68   |
| Succinic acid               |        |         |        |
| 苹果酸                         | 79.21  | 72.93   | 77.76  |
| Malic acid                  |        |         |        |
| 2,4-庚二烯酸                    | 15.26  | 16.66   | 16.65  |
| 2,4-Heptadienoic acid       |        |         |        |
| 柠檬酸                         | 7.71   | 7.21    | 7.81   |
| Citrate                     |        |         |        |
| 十六酸                         | 2.28   | 2.35    | 2.32   |
| Hexadecanoic acid           |        |         |        |
| 十七酸                         | 1.92   | 1.98    | 1.93   |
| Heptadecanoic acid          |        |         |        |
| 油酸                          | 1.96   | 2.05    | 1.94   |
| Oleate                      |        |         |        |
| 亚油酸                         | 2.05   | 2.11    | 2.05   |
| Linoleic acid               |        |         |        |
| 十八酸                         | 0.58   | 0.59    | 0.57   |
| Octadecanoic acid           |        |         |        |
| 总量                          | 137.53 | 132.39  | 137.61 |
| Overall amount              |        |         |        |

对于辐照加工、灭菌而言，合理的加速器选型能减少设备的购置与运行、维护费用，以辐照仓储烟叶菌虫害为例，单次通过束下即完成杀虫灭菌效率最高。因此，需要分析现有储运烟箱的烟叶堆积情况在不同能量电子束辐照条件下的穿透深度，为实际烟草杀菌灭虫过程的加速器选型提供参考。

表5 辐照处理前后人工评吸分析  
Table 5 Artificial tasting scores before and after irradiation treatment

| 人工评吸项目                        | 空白对照     | 200 keV  |
|-------------------------------|----------|----------|
| Artificial tasting indicators | Blank    | 6 s      |
| 香气质 Aroma                     | 6.5      | 6.2      |
| 香气量 Fragrance quantity        | 6.5      | 6.2      |
| 透发性 Transmissive              | 6.5      | 6.3      |
| 浓度 Consistency                | 6.5      | 6.5      |
| 柔细度 Tenderness                | 6.5      | 6.5      |
| 余味 Aftertaste                 | 6.0      | 6.0      |
| 杂气 Unhygienic                 | 6.0      | 6.0      |
| 刺激性 Irritant                  | 6.5      | 6.3      |
| 劲头 Strength                   | 中 Medium | 中 Medium |
| 燃烧性 Combustibility            | 7.0      | 7.0      |
| 灰色 Grizzly                    | 7.0      | 7.0      |
| 总分 Totals                     | 70.8     | 68.4     |

本研究采用基于蒙特卡罗方法的Fluka软件仿真，仿真的束源参照EBLab-200加速器进行设置。辐照的靶样品选用小包装烟箱样品，该样品的高度是30 mm，仿真时适当扩大统计范围，统计的对象是电子束沿辐照方向的概率密度分布。仿真结果如图4所示，由EBLab-200加速器产生的200 keV电子束的穿透深度仅达15 mm，这表明低能加速器的电子束穿透能力较差，有效作用区域仅在烟箱表面，无法对烟箱内部烟叶的菌虫进行消杀，需要采用中高能电子辐照加速器进行烟叶灭菌。

由上文所述，由于低能电子束穿透能力不够，不适合烟箱的灭菌处理。考虑到未来的工业化方案，转而研究中、高能加速器在相同烟叶堆积密度下的穿透情况。将电子束的仿真能量设置为1 MeV、2 MeV和3 MeV。辐照的靶样品尺寸参照实际用于仓储的烟箱，规格是1 136 mm×720 mm×725 mm，仿真统计对象是烟箱沿辐照方向的电子概率密度分布，统计区域包含了烟箱所处的0~

725 mm 范围并适当扩大。1 MeV 能量的电子束仿真结果如图 5 所示, 当 1 MeV 的电子束辐照烟箱时, 虽然沿辐照方向均有电子分布, 但大多数电

子均作用于烟箱的上部 200 mm 处, 在该能量下沿辐照方向的剂量分布不均匀, 单次辐照下烟箱下部的烟叶没有得到有效消杀。

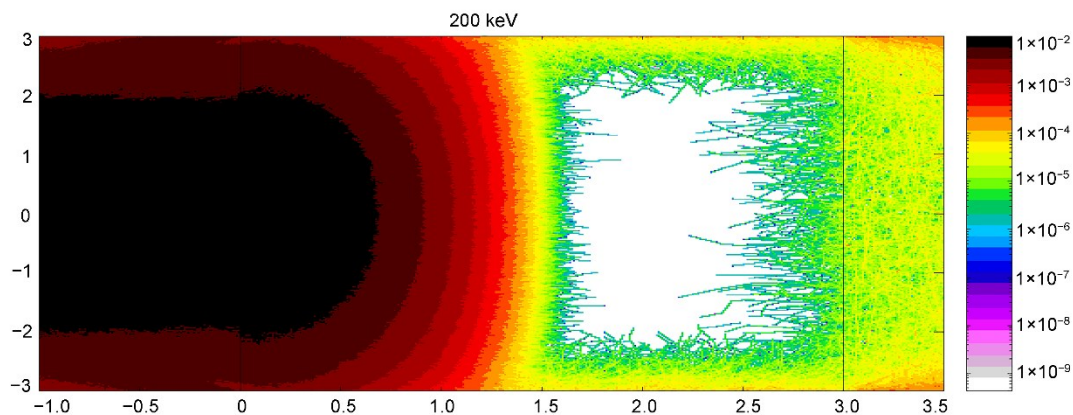


图4 200 keV 电子束 Fluka 仿真模拟电子概率密度分布图  
Fig.4 200 keV electron beam Fluka simulation modeling electron probability density distribution

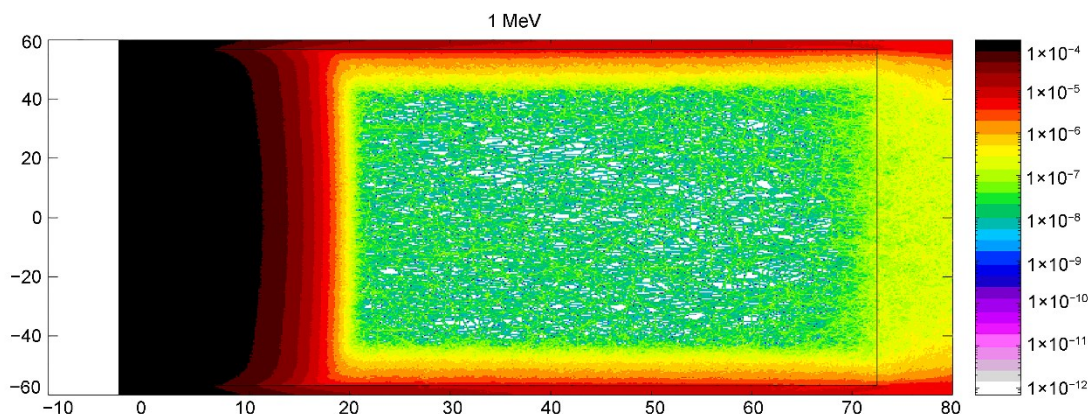


图5 1 MeV Fluka 仿真模拟电子分布图  
Fig.5 1 MeV Fluka simulation of the simulated electron distribution

对于 2 MeV 电子束的辐照过程, 其他仿真的条件设置同 1 MeV, 仿真结果如图 6 所示。当电子的能量达到 2 MeV 时, 烟箱样品的垂直方向有效

作用深度达到了 442.5 mm, 此时可以通过在两次辐照之间翻面, 使得整个烟箱被完全穿透, 但同时也会带来更多的人工费用。

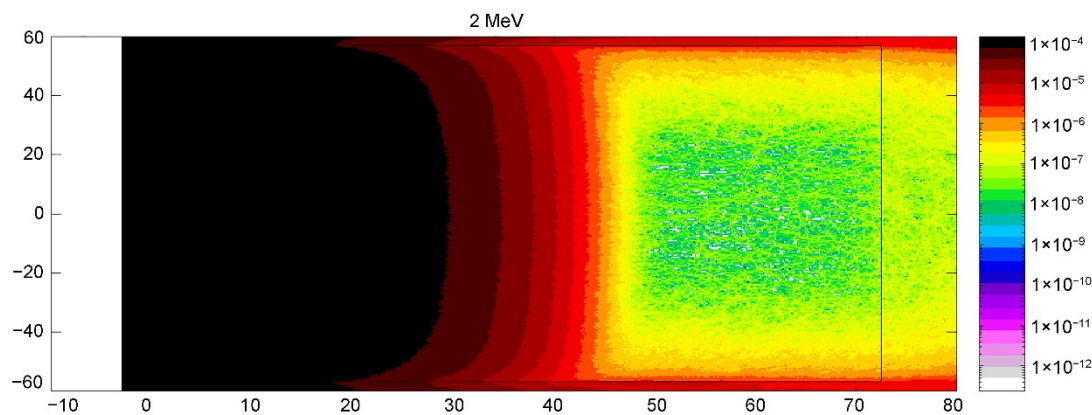


图6 2 MeV Fluka 仿真模拟电子概率密度分布图  
Fig. 6 2 MeV Fluka simulation of the simulated electron probability density distribution

对于3 MeV电子束的辐照过程,其他仿真的条件设置同1 MeV,仿真结果如图7所示。3 MeV能量的电子束沿辐射方向可以有效穿透烟箱样品,在合适辐照工艺的配合下,单次辐照即可使得整个烟箱中的潜在细菌及虫害被消灭。结合加速器设备的购置与维护方面考虑,电子束的能量达到3 MeV时即可对现有的标准储运烟箱完全穿透。为了更直观地表示不同能级电子束对储运烟叶的穿透能力,在不同能级的电子束条件下结合Fluka仿真结果对垂直方向的剂量分布作归一化处理,结果如图8所示。在图8的模拟仿真中,以现有的标准储运烟叶堆积密度适当扩大了垂直方向的统计范围,以探究不同能量的电子束对烟箱的穿透能

力。将相对剂量小于等于0.002的对应深度视为该能量电子束的最大穿透深度。1 MeV加速器可穿透的深度仅为215 mm,而2 MeV加速器为442.5 mm,随着电子束能量的不断提升,对现有的堆积烟叶垂直方向的最大穿透深度也对应提升,3 MeV中能加速器可穿透745 mm,这一数值完全满足现有的烟叶储运箱高度725 mm。当电子束的能量提高到5 MeV,最大穿透深度可达1 177.5 mm,而10 MeV电子束的能量非常强,实际最大穿透深度远超实际需求。上述仿真分析为烟叶辐照杀虫灭菌的工业化加速器选型提供了指导。

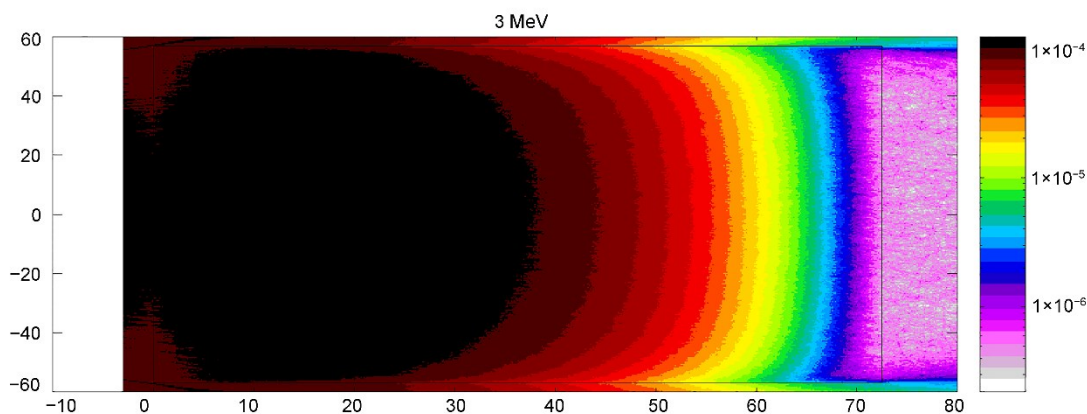


图7 3 MeV Fluka仿真模拟电子概率密度分布图

Fig. 7 3 MeV Fluka simulation of simulated electron probability density distribution

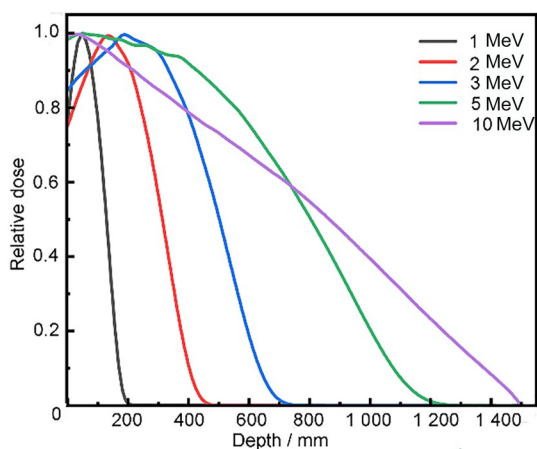


图8 Fluka仿真模拟不同能级电子束对堆积烟叶的相对剂量分布曲线(彩色见网络版)

Fig. 8 Relative dose distribution curves of stacked tobacco by electron beams of different energy levels simulated by Fluka simulation (color online)

### 3 结论

本研究针对烤烟烟叶遭受的菌虫侵扰,使用了不同能级的电子加速器对模拟菌虫情进行了辐照处理,并探讨了其在杀菌灭虫方面的效果。结果显示,200 keV、10 MeV两种能量的加速器分别在6 s和2 s内有效杀灭烟草甲虫及其他微生物,其对应剂量分别为9 kGy和3.7 kGy,在醇化仓库保持了38 d无菌状态。在此基础上,本研究还关注了辐照对烟叶品质的影响,研究发现,烟叶基本的理化性质、有机酸含量和矿质元素含量未出现明显变化。然而,香气质量有一定程度的降低,新植二烯量从589.91  $\mu\text{g/g}$ 降至418.64  $\mu\text{g/g}$ ,相应的评吸评分也有所降低。Fluka的仿真结果表明,3 MeV以上的能量均可有效穿透标准储运烟箱,这

为烟叶辐照灭菌的加速器选型提供了指导。本研究为电子束辐照防治仓储烟叶菌虫害技术提供了指导,降低电子束对烟叶品质的影响以及采用电子束辐照技术加速烟叶醇化应成为未来相关领域研究的重点。

**作者贡献声明** 王昆、黄江提出研究思路,设计研究方案;王昆、张琦、徐丰卓完成论文初稿撰写;陈锡昊完成了仿真模拟;李浩哲提供数据分析指导;陈志炎、周子健、张祯益对论文初稿进行修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

## 参考文献

- 1 Leão T, Perelman J, Clancy L, *et al.* Economic evaluation of five tobacco control policies across seven European countries[J]. *Nicotine & Tobacco Research: Official Journal of the Society for Research on Nicotine and Tobacco*, 2020, **22**(7): 1202-1209. DOI: 10.1093/ntr/ntz124.
- 2 Sharma N, Nazar G P, Chugh A, *et al.* Socio-economic status differences in changing affordability of tobacco products from 2011-2012 to 2018-2019 in India[J]. *Nicotine & Tobacco Research: Official Journal of the Society for Research on Nicotine and Tobacco*, 2023, **25**(4): 709-717. DOI: 10.1093/ntr/ntac230.
- 3 付海婧. 基于博弈点观念的我国城市控烟立法现状探析[J]. *现代商贸工业*, 2023, **44**(18): 208-210. DOI: 10.19311/j.cnki.1672-3198.2023.18.072.  
FU Haijing. Analysis on the current situation of urban tobacco control legislation in China based on the concept of game point[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2023, **44**(18): 208-210. DOI: 10.19311/j.cnki.1672-3198.2023.18.072.
- 4 毕洁, 文明明, 喻莉君, 等. 臭氧在储粮害虫防治中的应用研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, **43**(1): 131-138. DOI: 10.16433/j.1673-2383.2022.01.017.  
BI Jie, WEN Mingming, YU Lijun, *et al.* Research progress of ozone application in the control of stored grain pests[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, **43**(1): 131-138. DOI: 10.16433/j.1673-2383.2022.01.017.
- 5 罗云, 陈斌, 郭绍坤, 等. 烟叶仓储害虫综合治理研究进展[J]. *昆明学院学报*, 2021, **43**(6): 19-23. DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2021.06.004.  
LUO Yun, CHEN Bin, GUO Shaokun, *et al.* The progress of control technology on tobacco storage pests[J]. *Journal of Kunming University*, 2021, **43**(6): 19-23. DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2021.06.004.
- 6 刘志宇, 吴东, 黄勇, 等. 烟草粉蛾为害特征及利用麦蛾茧蜂进行生物防治的研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2021, **60**(S2): 42-45. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.S2.010.  
LIU Zhiyu, WU Dong, HUANG Yong, *et al.* Research progress on damage characteristics of *Ephestiahelutella* and biological control with *Habrobraconhebetor*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, **60**(S2): 42-45. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.S2.010.
- 7 任胜超, 彭琛, 林锐峰, 等. 物理气调法片烟养护及醇化效果研究[J]. *中国农学通报*, 2018, **34**(8): 95-103.  
REN Shengchao, PENG Chen, LIN Ruifeng, *et al.* Conservation and alcoholization of flue-cured tobacco lamina by physical modified atmosphere method[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, **34**(8): 95-103.
- 8 李志强, 钟俊鸿, 陈越立, 等. 我国储烟烟草甲和霉菌的发生现状与治理对策[J]. *广东农业科学*, 2009, **36**(12): 110-112, 115. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874x.2009.12.022.  
LI Zhiqiang, ZHONG Junhong, CHEN Yueli, *et al.* Occurrence status and control countermeasures of tobacco nail and mold in stored tobacco in China[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009, **36**(12): 110-112, 115. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874x.2009.12.022.
- 9 张鑫, 王苏红, 徐玮杰, 等. 仓储烟叶箱芯温度变化规律及预测预警研究: 以安徽凤阳地区片烟养护为例[J/OL]. *中国烟草学报*, 2023: 1-12. (2023-07-04) [2023-10-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2985.TS.20230703.1926.002.html>.  
ZHANG Xin, WANG Suhong, XU Weijie, *et al.* Study on variation characteristics, forecasting and early warning of inner temperature of tobacco leaves carton during storage- taking tobacco maintenance in Fengyang of Anhui Province as example[J/OL]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2023: 1-12. (2023-07-04) [2023-10-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2985.TS.20230703.1926.002.html>.
- 10 朱丽珊, 陈红松, 田震亚, 等. 寄主对瓜实蝇老熟幼虫和蛹的低温耐受性的影响[J]. *植物保护*, 2024, **50**(1): 165-171. DOI: 10.16688/j.zwbh.2023737.  
ZHU Lishan, CHEN Hongsong, TIAN Zhenya, *et al.* Effect of host on low temperature tolerance of mature larvae and pupae of melon fly[J]. *Plant Protection*, 2024, **50**(1): 165-171. DOI: 10.16688/j.zwbh.2023737.
- 11 范林林, 韩鹏祥, 冯叙桥, 等. 电子束辐照技术在食品工业中应用的研究与进展[J]. *食品工业科技*, 2014, **35**

- (14): 374-380. DOI: 10.13386/j. issn1002-0306.2014.14.074.
- FAN Linlin, HAN Pengxiang, FENG Xuqiao, *et al.* Research progress in the application development of electron beam irradiation in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, **35**(14): 374-380. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2014.14.074.
- 12 刘琼英, 邝炎华, 邓志群, 等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照中药材杀虫灭菌效果及主要有效成分变化的研究[J]. 华南农业大学学报, 1990, **11**(3): 76-84.
  - LIU Qiongying, KUANG Yanhua, DENG Zhiqun, *et al.* Study on the insecticidal and sterilizing effect of Chinese herbal medicines irradiated by  $\gamma$ -ray and the changes of main active ingredients[J]. Journal of South China Agricultural University, 1990, **11**(3): 76-84.
  - 13 郭丽莉, 吴国忠, 秦子淇. 辐照技术为武汉疫情提供快速高效的医用防护服灭菌服务[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, **38**(1): 011101. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2020.rj.38.011101.
  - GUO Lili, WU Guozhong, QIN Ziqi. Radiation technique provides fast and qualified sterilization service for disposable medical protective clothing to the fight against novel coronavirus pneumonia outbreak in Wuhan[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, **38**(1): 011101. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2020.rj.38.011101.
  - 14 郑秀艳, 孟繁博, 林茂, 等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 辐照对花生杀菌效果及其品质的影响[J]. 现代食品科技, 2018, **34**(1): 91-96, 67. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.1.015.
  - ZHENG Xiuyan, MENG Fanbo, LIN Mao, *et al.* Effects of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation on the sterilization and quality of arachis hypogaea. L[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, **34**(1): 91-96, 67. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.1.015.
  - 15 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 使用辐射显色薄膜和聚甲基丙烯酸甲酯剂量测量系统测量吸收剂量的标准方法: GB/T 15053—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
  - Standardization Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China: AOSIO. Standard method for using radiochromic film and polymethylmethacrylate dosimetry system to measure absorbed dose: GB/T 15053—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
  - 16 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
  - Standardization Administration of the People's Republic of China, National Health Commission of the People's Republic of China. State food and drug administration national standard for food safety microbiological examination of food hygiene - aerobic plate count: GB 4789.2—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
  - 17 Terpigov E L, Degtyareva O V, Savransky V V. Fourier transform infrared spectroscopy analysis of pigments in fresh tobacco leaves[J]. Physics of Wave Phenomena, 2019, **27**(1): 13-19. DOI: 10.3103/S1541308X19010035.
  - 18 王林, 周平, 贺佩, 等. 糖类物质对烟草香气品质的影响研究进展[J]. 中国烟草科学, 2021, **42**(6): 92-98. DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2021.06.014.
  - WANG Lin, ZHOU Ping, HE Pei, *et al.* Research progress on the influence of carbohydrates on tobacco aroma quality[J]. Chinese Tobacco Science, 2021, **42**(6): 92-98. DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2021.06.014.
  - 19 黄跃鹏, 罗福命, 李丽, 等. 南雄烟区气象因子与烟叶烟碱含量相关性分析[J]. 安徽农业科学, 2022, **50**(11): 184-186. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.11.047.
  - HUANG Yuepeng, LUO Fuming, LI Li, *et al.* Correlation analysis between meteorological factors and nicotine content in flue-cured tobacco leaves in Nanxiong tobacco area[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, **50**(11): 184-186. DOI: 10.3969/j. issn. 0517-6611.2022.11.047.
  - 20 史宏志, 李进平, Bush L P, 等. 烟碱转化率与卷烟感官评吸品质和烟气 TSNA 含量的关系[J]. 中国烟草学报, 2005, **11**(2): 9-14. DOI: 10.3321/j.issn: 1004-5708.2005.02.002.
  - SHI Hongzhi, LI Jinping, Bush L P, *et al.* Relationship of percent nicotine conversion with sensory evaluation scores and TSNA contents in cut tobacco and cigarette smoke[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2005, **11**(2): 9-14. DOI: 10.3321/j.issn:1004-5708.2005.02.002.
  - 21 张涛, 蒋弢, 赵正雄, 等. 砵砂烟醇化过程中生物碱与致香成分变化规律研究[J]. 江西农业学报, 2023, **35**(5): 14-22. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2023.05.003.
  - ZHANG Tao, JIANG Tao, ZHAO Zhengxiong, *et al.* Study on changes of alkaloids and aromatic components in cherry-red tobacco during aging process[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, **35**(5): 14-22. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2023.05.003.
  - 22 曹超逸, 潘义宏, 王全贞, 等. 采收成熟度对烟叶致香物质与感官质量的影响[J]. 中南农业科技, 2023, **44**(5): 30-35.

- CAO Chaoyi, PAN Yihong, WANG Quanzhen, *et al.* Effect of harvest maturity on aromatizing substances and sensory quality of tobacco leaves[J]. Journal of central south agricultural science and technology, 2023, **44**(5): 30-35.
- 23 周昆, 周清明, 胡晓兰. 烤烟香气物质研究进展[J]. 中国烟草科学, 2008, **29**(2): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5119.2008.02.014.
- ZHOU Kun, ZHOU Qingming, HU Xiaolan. Advance in aroma substances in flue-cured tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2008, **29**(2): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-5119.2008.02.014.
- 24 赵晓丹, 史宏志, 钱华, 等. 不同类型烟草常规化学成分与中性致香物质含量分析[J]. 华北农学报, 2012, **27**(3): 234-238. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7091.2012.03.046.
- ZHAO Xiaodan, SHI Hongzhi, QIAN Hua, *et al.* Comparison of composition and contents of chemical component and neutral aroma components in different types of tobacco[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, **27**(3): 234-238. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7091.2012.03.046.
- 25 宫长荣, 汪耀富, 赵铭钦, 等. 烘烤过程中烟叶香气成份变化的研究[J]. 烟草科技, 1995, **28**(5): 31-33. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.1995.05.012.
- GONG Changrong, WANG Yaofu, ZHAO Mingqin, *et al.* Study on the change of aroma components of tobacco leaves during curing[J]. Tobacco Science and Technology, 1995, **28**(5): 31-33. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.1995.05.012.
- 26 刘百战, 洗可法. 不同部位、成熟度及颜色的云南烤烟中某些中性香味成分的分析研究[J]. 中国烟草学报, 1993(1): 46-53.
- LIU Baizhan, XIAN Kefa. Analytical studies on some neutral flavor components in Yunnan roasted cigarettes of different parts, maturity and colors[J]. Acta Tabacaria Sinica, 1993(1): 46-53.
- 27 周淑平, 肖强, 陈叶君, 等. 不同生态地区初烤烟叶中重要致香物质的分析[J]. 中国烟草学报, 2004, **10**(1): 9-16. DOI: 10.3321/j.issn: 1004-5708.2004.01.002.
- ZHOU Shuping, XIAO Qiang, CHEN Yejun, *et al.* Analysis of important aroma components in flue-cured tobacco leaves from different ecological regions[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2004, **10**(1): 9-16. DOI: 10.3321/j.issn: 1004-5708.2004.01.002.
- 28 陈江华, 刘建利, 龙怀玉. 中国烟叶矿质营养及主要化学成分含量特征研究[J]. 中国烟草学报, 2004, **10**(5): 24-31. DOI: 10.3321/j.issn: 1004-5708.2004.05.004.
- CHEN Jianghua, LIU Jianli, LONG Huaiyu. The distribution characteristics of nutrition elements and main chemical composition in China's tobacco leaves[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2004, **10**(5): 24-31. DOI: 10.3321/j.issn: 1004-5708.2004.05.004.
- 29 李鹏飞, 李大肥, 兰富和, 等. 不同新品种烤烟非挥发性有机酸含量的差异[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, **30**(1): 154-158. DOI: 10.16211/j.issn.1004-390X(n).2015.01.027.
- LI Pengfei, LI Dafei, LAN Fuhe, *et al.* Analysis of the content of nonvolatile organic acids in different new flue-cured tobacco varieties[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2015, **30**(1): 154-158. DOI: 10.16211/j.issn.1004-390X(n).2015.01.027.
- 30 彭桂新, 杨永锋, 胡静宜, 等. 基于非挥发性有机酸的浓香型配打模块烟叶评价指标[J]. 烟草科技, 2020, **53**(3): 89-96. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2019.0409.
- PENG Guixin, YANG Yongfeng, HU Jingyi, *et al.* Blending and threshing modules with robust flavor style based on non-volatile organic acids in flue-cured tobacco [J]. Tobacco Science & Technology, 2020, **53**(3): 89-96. DOI: 10.16135/j.issn1002-0861.2019.0409.
- 31 王鹏泽, 来苗, 陶陶, 等. 不同香型烤烟主要香味物质成分与香韵指标的关系研究[J]. 中国农业科技导报, 2015, **17**(3): 126-135. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2015.011.
- WANG Pengze, LAI Miao, TAO Tao, *et al.* Relationships between main aroma constituents and aroma notes index of flue-cured tobacco leaves of different flavor styles[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, **17**(3): 126-135. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2015.011.
- 32 刘百战, 蔡继宝, 朱立军, 等. 国内外部分白肋烟烟叶中非挥发性有机酸、高级脂肪酸、生物碱及pH值的对比分析[J]. 中国烟草学报, 2002, **8**(2): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn:1004-5708.2002.02.001.
- LIU Baizhan, CAI Jibao, ZHU Lijun, *et al.* Analysis of nonvolatile organic acids, high fatty acids, alkaloids and pH values of some domestic and foreign burly tobaccos [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2002, **8**(2): 1-5. DOI: 10.3321/j.issn:1004-5708.2002.02.001.