

脉冲强光对木耳及其浸提液中 抗生素的降解效果及品质影响

焦睿智, 郭天敏, 李靖妍, 岳田利, 高振鹏, 崔璐, 王周利*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以黑木耳及其浸提液为试验对象, 探究不同条件的脉冲强光处理对木耳及浸提液中喹诺酮类抗生素(恩诺沙星与环丙沙星)的降解作用及品质变化情况。结果表明: 对鲜木耳脉冲强光处理时, 光照距离 5 cm, 抗生素浓度在 0.5 mg/kg, 脉冲强光处理次数在 30 次时可使恩诺沙星与环丙沙星降解率最高分别可达 82.84%和 81.10%, 脉冲强光处理使木耳的总糖含量约下降 12.25%, 其余理化指标: 粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、灰分含量等无显著性变化 ($P < 0.05$), 处理后的木耳营养成分仍满足国标要求。同时, 木耳浸提液的处理中脉冲光照距离为 5 cm, 浸提液稀释 5 倍, 抗生素浓度为 0.5 mg/kg, 脉冲强光处理次数在 30 次时可将两种抗生素分别降解 99.17%和 98.61%; 脉冲强光处理 30 次时对木耳浸提液的颜色影响 ΔE 变化为 1.51, 对其 pH 值、透光率无明显影响。脉冲强光处理可使黑木耳的抗生素降解率达 81%以上, 浸提液中抗生素降解率达 98%以上, 可以用于对抗生素的降解处理并有效保证其品质, 对食用菌的抗生素控制提供了新思路。

关键词: 脉冲强光; 黑木耳; 抗生素; 降解; 理化品质

文章编号: 1673-9078(2023)07-298-304

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.7.0901

Effects of Pulsed Light on Antibiotics Degradation and Quality of *Auricularia auricula* and Its Extract

JIAO Ruizhi, GUO Tianmin, LI Jingyan, YUE Tianli, GAO Zhenpeng, CUI Lu, WANG Zhouli*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In this experiment, *Auricularia auricula* and its extract were used as the test objects. The degradation of quinolone antibiotics (enrofloxacin and ciprofloxacin) in *Auricularia auricula* and its extract as well as their quality changes were studied under different pulsed light treatment conditions. The results showed that when the fresh *Auricularia auricula* was treated with high intensity pulsed light, a pulsed light distance of 5 cm and an antibiotic content of 0.5 mg/kg could lead to the highest degradation rates of enrofloxacin and ciprofloxacin (82.84% and 81.10%, respectively) after 30 times of pulsed light treatment. The total sugar content of *Auricularia auricula* significantly decreased (by 12.25%), with other physicochemical indexes, including crude protein, crude fat, crude fiber and ash content changing insignificantly ($P < 0.05$). The nutritional components of the treated *Auricularia auricula* still met the national standard requirements. Meanwhile, the degradation of the two antibiotics was 99.17% and 98.61%, respectively, when the irradiation distance of pulsed light was 5 cm, the extract was diluted five times, the antibiotic concentration was 0.5 mg/kg, and the number of pulsed light treatment was 30 times. The chroma change ΔE was 1.51 after 30 times of the pulsed light treatment, though there were no obvious effects on the pH and light transmittance. The pulsed light treatment could degrade more than 81% of antibiotics in *Auricularia auricula* and 98% of antibiotics in its extract, indicating that it can be used to treat antibiotics and effectively preserve its quality. The finding provides new ideas for antibiotic control of edible fungi.

引文格式:

焦睿智, 郭天敏, 李靖妍, 等. 脉冲强光对木耳及其浸提液中抗生素的降解效果及品质影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7): 298-304.

JIAO Ruizhi, GUO Tianmin, LI Jingyan, et al. Effects of pulsed light on antibiotics degradation and quality of *Auricularia auricula* and its extract [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 298-304.

收稿日期: 2022-07-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1606701)

作者简介: 焦睿智 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与食品质量安全检测控制, E-mail: 357875897@qq.com

通讯作者: 王周利 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品加工与食品质量安全检测控制, E-mail: wzl1014@nwsuaf.edu.cn

Key words: pulsed light; *Auricularia auricula*; antibiotics; degradation; physicochemical quality

黑木耳肉质细腻、营养丰富,为我国珍贵的药食兼用胶质真菌。黑木耳作为食用菌中的第二大产业,已经在全国 20 多省进行人工栽培或自然生长,2019 年全国黑木耳产量已超过 700 万 t 且其产业规模仍在不断扩大。但是,近年来医药和兽类抗生素的大量使用,使污染物不断地排放到自然环境中^[1]。目前,在自然环境不同基质中都检测到人类和兽用抗生素的残留^[2]。喹诺酮类抗生素作为常见兽药成分,在木耳的栽培基料如木屑、麸皮中都有其残留,随着木耳生长,过量的抗生素最终残留在木耳中,其被人食用后可引起过敏反应、器官损伤、急性中毒等^[3]。我国农业部也对食用菌中的恩诺沙星、环丙沙星等喹诺酮类抗生素制定了 10~500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的残留限量^[4],故建立有效控制木耳中抗生素的方法非常必要。

脉冲强光作为一种非热处理技术,主要的作用方式包括光化作用及光热作用,利用瞬间放电以脉冲的形式激发灯管中的惰性气体,发出强烈的白光。光谱分布与太阳光近似(100~1 100 nm),其光强度相当于地球表面太阳光的数千至数万倍^[5]。脉冲强光技术在杀菌领域已有广泛应用,基于其原理在水处理、食品饮料杀菌、毒素降解等领域也有所应用。Espedito 等^[6]在连续脉冲光下进行消毒,使得液体中 *Staphylococcus aureus* 完全失活;Preetha 等^[7]的脉冲光处理试验表明当用 95.2 J/cm^2 的脉冲光剂量处理时,橙汁、菠萝汁和嫩椰子汁中大肠杆菌(MTCC 433)的浓度分别降低了 4.0、4.5 和 5.33 个对数值,表现出较强的杀菌效果;Moreau 等^[8]也证明脉冲强光处理可使黄曲霉毒素 B₁ 减少 92.7%且可完全消除这种真菌毒素的诱变潜力;Wang 等^[9]研究表明脉冲光对赭曲霉毒素 A 的降解率可达 95.29%且大大减轻了高剂量赭曲霉毒素 A 对小鼠的毒性作用。脉冲强光特有的作用方式及其在相关食品体系中优良的杀菌效果和毒素降解性能,为食品体系中农药残留、抗生素等质量安全因子的控制提供了新的思路与方法。

目前,对于抗生素控制的探究主要在于水源中的多种抗生素污染问题处理^[10],对一些食品中的抗生素污染控制^[11]等,因食用菌中抗生素的国家限量标准及检测方法目前没有明确规定,故对其研究较少;而对于木耳的研究主要有木耳中可溶性多糖的功能化研究^[12]以及其深加工产品的开发^[13]等,涉及到木耳中农药残留、抗生素等的残留控制研究方面的报道也很少。因此,本研究以脉冲强光处理为核心手段,重点研究了鲜木耳及其浸提液中两种喹诺酮类抗生素的降解情

况,对脉冲强光处理后的鲜木耳及其浸提液的营养品质进行分析,以期对食用菌中抗生素的控制提供理论支持和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

原料:试验用木耳产自陕西省商洛市柞水县下梁镇西川村。

试剂:恩诺沙星(纯度 $\geq 98\%$)、环丙沙星(纯度 $\geq 98\%$),阿拉丁试剂有限公司;甲醇、甲酸、乙腈(色谱纯),四川西陇科学有限公司;乙二胺四乙酸二钠、柠檬酸、磷酸二氢钠、无水硫酸钠、氯化钠(分析纯),广州光华科技股份有限公司;PSA(二乙胺-N-丙基硅烷),烟台青云仪器设备有限公司。

仪器:HC-3018R 型高速冷冻离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;XH-D 涡旋混合器,上海汉诺仪器有限公司;LC-20A 型高效液相色谱仪,日本岛津公司;FD2000 型脉冲强光设备,荷兰脉冲光 BV 公司;FE28 型 pH 计,梅特勒-托利多仪器有限公司;CS-820 色度仪,杭州彩谱科技有限公司;UV-1700 型紫外可见分光光度计,日本岛津公司;FW-400AD 高速万能粉碎机,天津鑫博得仪器有限公司;CS-820 台式分光测色仪,杭州彩谱科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备

1.2.1.1 木耳浸提液制备

将试验使用的黑木耳晾干,通过破壁机绞成粉末并过 40 目筛,称取一定量的黑木耳粉末,加 50 倍质量的水在 80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中浸提 2 h,然后用 8 层纱布过滤,得到 1 次浸提液;滤渣再加 30 倍质量的水,静置 30 min 以后用同样方法得到 2 次浸提液。将 1、2 次浸提液混合,即得到所需的黑木耳浸提液,颜色为棕色且有黑木耳的清香味。

1.2.1.2 混合标准品配制

准确称取恩诺沙星、环丙沙星两种抗生素标品 30 mg 溶于 30 mL 乙腈(色谱纯)中配置成浓度为 1 g/L 的混合标准品,避光置于 -18 $^{\circ}\text{C}$,可保存 6 个月。

1.2.2 脉冲强光对鲜木耳及其浸提液中抗生素处理

1.2.2.1 脉冲强光处理对鲜木耳中抗生素降解效果评价
将新鲜采集的黑木耳分别在抗生素浓度为 1、2、

4、8、16 mg/kg 的水中浸泡两小时, 室温 23 ℃, 经高效液相色谱仪检测处理后样品的初始浓度, 使其分别含有 0.5、1、2、4、8 mg/kg 的抗生素, 使用脉冲强光设备处理木耳样品, 单次脉冲能量强度为 0.98 J/cm²。依次改变脉冲光照距离 (5、10、15、20、25 cm), 固定脉冲强光处理次数 20 次, 抗生素初始浓度 0.5 mg/kg; 改变脉冲强光处理次数 (5、10、20、30、40 次), 固定脉冲光照距离 5 cm, 抗生素初始浓度 0.5 mg/kg; 改变木耳中含有的抗生素初始浓度 (0.5、1、2、4、8 mg/kg), 固定脉冲光照距离 5 cm, 脉冲强光处理次数 20 次, 分别对鲜木耳进行脉冲强光处理试验, 将处理后样品取 1 g 进行样品前处理并按色谱条件参数进行高效液相色谱分析。

1.2.2.2 脉冲强光处理对木耳浸提液中抗生素降解效果评价

向直径为 9 cm 的一次性培养皿中加入 5 mL 上述制备的木耳浸提液, 使液体铺满皿底部, 使用脉冲强光设备处理木耳浸提液, 单次脉冲能量强度为 0.98 J/cm²。依次改变脉冲光照距离 (5、10、15、20、25 cm), 固定木耳浸提液稀释倍数 1 倍, 脉冲强光处理次数 20 次, 浸提液抗生素初始浓度 0.5 mg/kg; 改变浸提液稀释倍数 (1、2、3、4、5 倍) 即改变木耳浸提液的浑浊度, 固定脉冲强光处理次数 20 次, 浸提液抗生素初始浓度 0.5 mg/kg, 光照距离 5 cm; 改变脉冲强光处理次数 (5、10、20、30、40 次), 固定木耳浸提液稀释倍数 1 倍, 浸提液抗生素初始浓度 0.5 mg/kg, 光照距离 5 cm; 改变浸提液中的抗生素初始浓度 (0.5、1、2、4、8 mg/kg), 固定木耳浸提液稀释倍数 1 倍, 光照距离 5 cm, 脉冲强光处理次数 20 次, 分别对木耳浸提液进行脉冲强光照试验探究不同因素对木耳浸提液中抗生素的降解效果, 后续对试液进行

1.2.2.3 完全降解试验

对 0.5、1、2、4、8 mg/kg 五种不同初始抗生素浓度含量的木耳浸提液进行脉冲强光处理, 闪照次数依次从 10 次增加至 40 次, 光照距离固定为 5 cm, 评价用高效液相色谱仪进行检测其抗生素残留量, 评价能完全降解木耳浸提液中不同浓度抗生素对应所需的脉冲强光处理次数。

1.2.3 液相色谱分析方法

1.2.3.1 样品前处理

参照张科明等^[14]检测多种兽药残留的前处理方法并做修改。

样品处理: 取木耳样品约 100 g, 用粉碎机粉碎、混匀后装入洁净的密封袋, 密闭并标明编号, 于干燥

处保存。

提取: 称取 1 g 样品置于 100 mL 塑料离心管中, 加入 8 mL Na₂ EDTA-McIlvaine 缓冲液, 振荡涡旋 1 min, 再加入 17 mL 5% (V/V) 甲酸乙腈, 振荡涡旋 1 min, 然后加入 2 g 氯化钠、3 g 无水硫酸钠, 迅速摇匀, 振荡涡旋 1 min, 以 5 000 r/min 离心 5 min, 取出上清液待净化。

净化: 称取 0.15 g PSA (乙二胺-N-丙基硅烷), 并加入 0.5 g 无水硫酸钠置于 10 mL 离心管中, 向其中加入上述离心管中的上清液 5 mL 后充分混合, 以 5 000 r/min 离心 5 min, 吸取上清液 1 mL 过 0.22 μm 有机相滤膜, 装瓶, 于 -20 ℃ 保存, 供高效液相色谱测定。

1.2.3.2 色谱条件

色谱柱: C18 柱 4.6×150 mm; 流速: 0.8 mL/min; 柱温: 30 ℃; 进样量: 20 μL; 流动相 A 为乙腈, 流动相 B 为 0.7% (V/V) 磷酸水溶液, 等度洗脱 (A 相 20%; B 相 80%), 检测器: 荧光检测器。

1.2.4 脉冲强光处理后的品质变化

1.2.4.1 脉冲强光处理对鲜木耳的品质影响

参照国标检测方法要求, 对脉冲光照前后的鲜木耳的总糖 (GBT 15672-2009, 食用菌中总糖含量测定)^[15]、粗蛋白 (GB 5009.5-2016, 食品中蛋白质的测定)^[16]、粗脂肪 (GB 5009.6-2016, 食品中脂肪的测定)^[17]、粗纤维 (GBT 5009.10-2003, 植物类食品中粗纤维的测定)^[18]、灰分 (GB 5009.4-2016, 食品中灰分的测定)^[19]等木耳的基础理化指标进行评价, 分析光照对其品质的影响。

1.2.4.2 脉冲强光处理对木耳浸提液的品质影响

对脉冲光照前后的木耳浸提液的 pH 值、透光率、色度等理化指标评价, 分析脉冲前后木耳浸提液的品质变化。

pH 值: 用 pH 计直接检测。

透光率: 使用紫外可见分光光度计在 254 nm 波长下以蒸馏水为 100% 测定木耳浸提液的透光率读数。

色度: 用色度仪测试。

1.2.5 数据处理与分析

每个实验均做 3 次平行, 使用 Origin 2018 软件作图, 采用 SPSS 18 软件对数据进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 脉冲强光处理对鲜木耳的抗生素降解率影响

脉冲强光处理对鲜木耳中抗生素降解处理效果如图1所示,图1a表示经脉冲强光处理后,恩诺沙星与环丙沙星两种抗生素的降解效果随光照距离变远而下降,且在光照距离为5 cm时抗生素的降解效果最好,对恩诺沙星及环丙沙星两种抗生素的降解率分别可达68.26%与64.50%,随光照距离变远至25 cm时,降解率仅有36.61%和29.72%,可能由于脉冲强光的能量传递距离变长,使相同光照面积下受到的光照强度产生明显降低导致对抗生素的降解效果有明显下降^[20];当抗生素初始浓度在0.5~8 mg/kg范围内时,图1b表明抗生素初始浓度的升高会使脉冲强光处理的降解率下降,浓度在0.5 mg/kg时恩诺沙星和环丙沙星两种抗生素的降解率能达到63.30%和57.61%,而在抗生素初始浓度升高至8 mg/kg时降解率仅分别达到44.61%和41.17%,可能是脉冲光的紫外辐射能够产生水合电子等促进有机物降解的活性粒子,因此当抗生素初始浓度较高时单位体积底物受到紫外辐射量减小,单位体积底物接触的活性粒子也相对减少,所以降解速率较低。王蓓^[5]的研究表明微囊藻毒素-RR的初始浓度升高时,脉冲强光处理的降解效率会降低,Gh等^[21]也发现在最近光照距离下龙舌兰菌菌株在最低初始浓度及膜液厚度时对其致死率最高,可达到99%;图1c表示当闪照次数从5次逐渐增加30次时,抗生素的降解率快速增大,再次增加闪照次数对抗生素降解率变化影响不大,即闪照次数在30次时降解效果较好。Funes等^[22]研究苹果汁中的展青霉素降解情况时,毒素剩余量也随脉冲强光处理次数增加而降低,但同样的展青霉素的降解情况变化不完全与脉冲强光处理次数呈一次线性趋势。结果表明,脉冲强光处理距离越近、抗生素初始浓度越低、脉冲强光处理次数越高抗生素的降解效果越好,光照距离为5 cm,抗生素浓度在0.5 mg/kg,闪照次数在30次时可达最理想的降解效果,恩诺沙星与环丙沙星降解率最高分别可达82.84%和81.10%。本试验中抗生素降解效果受不同因素的影响均为单向线性变化,故不对其再做正交试验或响应面试验来确定其最优降解参数。

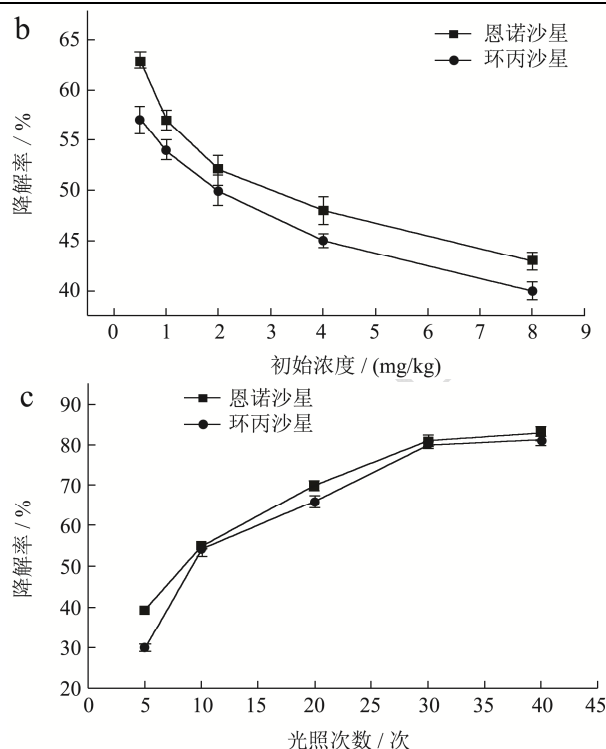
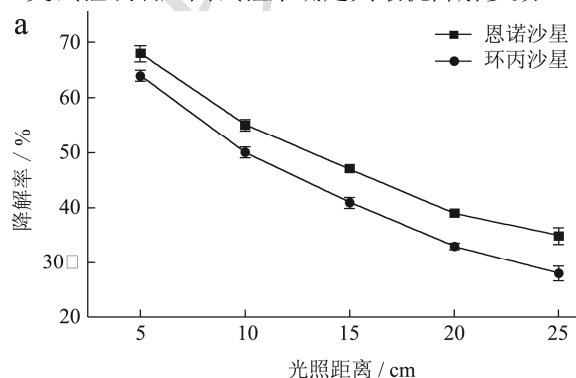


图1 脉冲强光对鲜木耳中抗生素降解处理

Fig.1 Degradation of antibiotics in fresh *Auricularia auricula* by pulsed light

注: (a) 为不同光照距离的脉冲强光处理对鲜木耳中抗生素降解率的影响; (b) 为脉冲强光处理对不同抗生素初始浓度的鲜木耳中抗生素降解率的影响; (c) 为不同次数的脉冲强光处理对鲜木耳中抗生素降解率的影响。

2.2 脉冲强光处理对木耳浸提液的抗生素降解效果评价

2.2.1 不同因素对脉冲强光处理降解木耳浸提液中抗生素影响

由于鲜木耳的结构紧密,脉冲强光不易直接穿透对木耳内部,而现有研究脉冲强光处理对应用于各种场景的表面杀菌、降解毒素等环境更为普遍^[20],故本试验设计为使在木耳果冻、木耳粉等深加工产品过程中的木耳产品抗生素含量符合标准,对其生产过程中的关键原料木耳浸提液进行脉冲强光处理,以期能为木耳深加工过程中的木耳抗生素超标的控制提供更好的理论支持。

脉冲强光处理对鲜木耳中抗生素降解处理效果如图2所示,由图2a可得,经脉冲强光处理后,两种喹诺酮类抗生素恩诺沙星与环丙沙星抗生素均随着光照距离变远降解率有明显的下降,其中在光照距离最近为5 cm时抗生素的降解效果最好,对恩诺沙星与环丙沙星的降解率分别可达86.13%与83.05%,相对直接

处理鲜木耳的抗生素降解率有明显升高;图 2b 木耳浸提液中抗生素的降解效率随木耳浸提液的稀释倍数增加而升高,即浸提液的浑浊度降低对木耳浸提液的降解效果有显著性的影响,溶液中浑浊度降低对脉冲强光处理的穿透性效果体现越明显使其对抗生素的降解效果越明显,在浸提液稀释倍数为 5 倍时,恩诺沙星和环丙沙星两种抗生素的降解率分别可达 95.55%和 94.37%;图 2c 表明与脉冲强光处理鲜木耳相同的,抗生素初始含量的升高使脉冲光照的降解率下降,浓度在 0.5 mg/kg 时恩诺沙星和环丙沙星两种抗生素的降解率分别能达到 88.35%和 85.10%;图 2d 表现出闪

照次数在 30 次时降解效果明显,两种抗生素的降解率均达到 98.50%以上,在 40 次时可达到完全降解,且闪照次数对抗生素降解效果影响较大,在光照 5 次至 30 次时抗生素的降解率可升高 30%以上。结果表明,脉冲强光处理距离越近、抗生素初始含量越低、木耳浸提液浑浊度越低、脉冲强光处理次数越多抗生素的降解效果越好,且在处理 30 次之后的效果变化不大。光照距离为 5 cm,抗生素浓度在 0.5 mg/kg,浸提液稀释倍数为 5 倍,闪照次数在 30 次时可使恩诺沙星与环丙沙星降解率达到 99.17%和 98.61%。

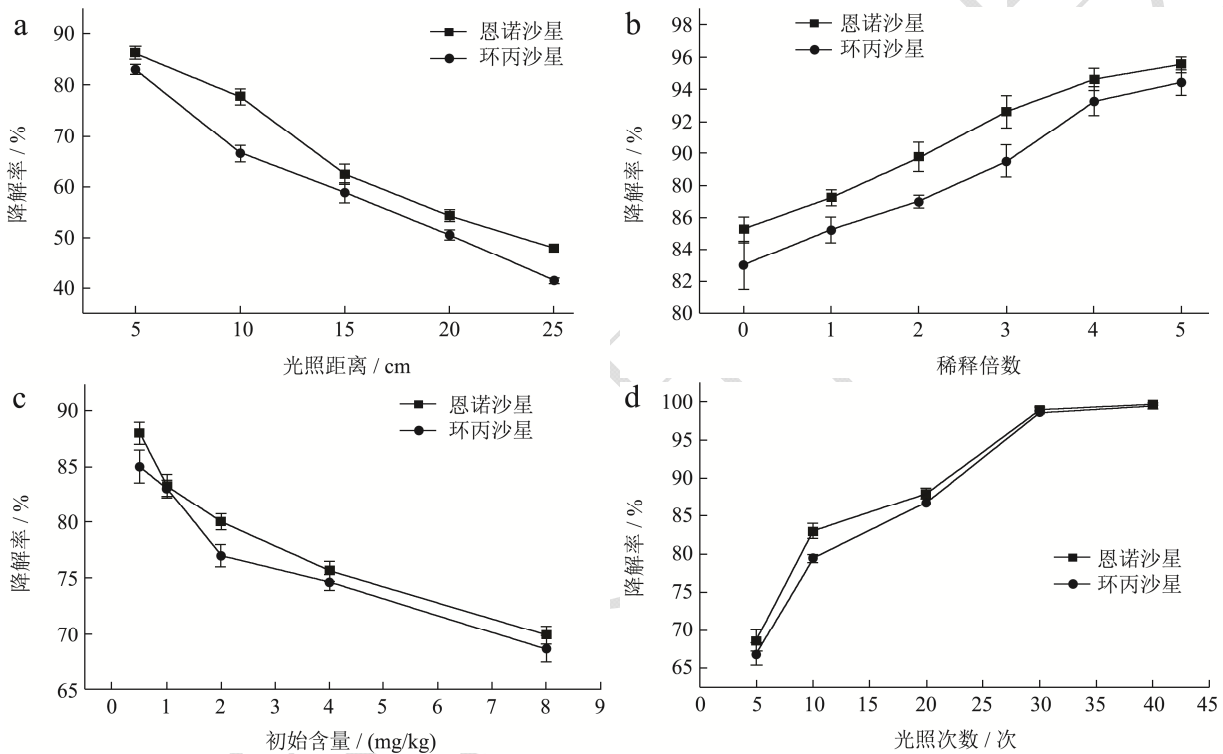


图 2 脉冲强光对木耳浸提液中抗生素降解处理

Fig.2 Degradation of antibiotics in *Auricularia auricula* extract by pulsed light

注: (a) 为不同光照距离的脉冲强光处理对木耳浸提液中抗生素降解率的影响; (b) 为不同稀释倍数的木耳浸提液受脉冲强光处理后的抗生素降解变化; (c) 为脉冲强光处理对不同抗生素初始含量的木耳浸提液中抗生素降解率的影响; (d) 为不同次数的脉冲强光处理对木耳浸提液中抗生素降解率的影响。

2.2.2 完全降解试验

表 1 不同抗生素初始含量下两种抗生素被完全降解所需的脉冲强光处理次数 (次)

Table 1 Pulsed light times required for complete degradation of

two antibiotics at different initial concentrations

抗生素 种类	初始含量/(mg/kg)				
	0.5	1	2	4	8
环丙沙星	30	30	30	40	40
恩诺沙星	30	30	30	40	40

在木耳深加工过程中处理含有不同含量抗生素的木耳浸提液,使工业生产木耳浸提液过程中抗生素得

到完全控制,设计对两种喹诺酮类抗生素的完全降解试验,对 0.5、1、2、4、8 mg/kg 五种不同初始抗生素含量的木耳浸提液进行脉冲强光处理,评价能完全降解木耳浸提液中不同含量抗生素对应所需的脉冲强光处理次数。根据表 1 结果,在抗生素含量为 2 mg/kg 以下时,最高需要脉冲强光处理 30 次即可使恩诺沙星、环丙沙星两种喹诺酮类抗生素完全降解,在含量为 2~8 mg/kg 时则需将闪照次数提高至 40 次才可对其进行完全降解,该闪照次数参数可为大规模木耳浸提液的抗生素完全降解提供理论支持,并可在后续试验中继续完善对其他类抗生素的降解情况,为脉冲强光

处理在木耳深加工中对抗生素去除的实际应用提供技术支持。

2.3 脉冲强光处理后的品质变化

2.3.1 脉冲强光处理对鲜木耳的品质影响

由表 2 可得脉冲强光处理对鲜木耳中总糖含量有显著影响, 相比未进行脉冲强光处理的木耳总糖含量降低约 12%, 但仍高于国家标准要求的总糖含量 $\geq 22\%$, 其余理化指标如粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、

灰分等在脉冲强光处理 10 至 40 次均无明显变化, 且均符合 GB/T 6192-2019 中黑木耳的理化指标要求。脉冲强光的光化学反应与光热反应在木耳表面形成瞬时高温, 但闪照时间变长可能会导致木耳中糖分由于高温而发生部分分解, 以及少量与蛋白质发生的褐变反应, 而使木耳的总糖含量产生较明显的降低。周婷婷等^[23]在研究脉冲强光处理对菜籽油品质的影响试验结果表明脉冲强光处理对菜籽油的粗纤维、粗脂肪等品质影响变化也不明显。

表 2 不同脉冲强光处理次数对鲜木耳的品质影响

Table 2 Effect of different pulsed light times on quality of fresh *Auricularia auricula*

闪照次数	总糖/%	粗蛋白/%	粗脂肪/%	粗纤维/%	灰分/%
0	39.89±0.11 ^a	12.18±0.17 ^a	0.54±0.03 ^a	4.60±0.15 ^a	4.20±0.08 ^a
10	36.64±0.16 ^b	12.18±0.11 ^a	0.55±0.03 ^a	4.40±0.13 ^a	4.18±0.08 ^a
20	32.21±0.13 ^c	12.13±0.10 ^a	0.53±0.04 ^a	4.50±0.13 ^a	4.17±0.07 ^a
30	26.27±0.22 ^d	12.21±0.05 ^a	0.51±0.04 ^a	4.40±0.13 ^a	4.17±0.07 ^a
40	27.64±0.08 ^d	12.02±0.02 ^a	0.52±0.03 ^a	4.40±0.13 ^a	4.17±0.08 ^a

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P>0.05$)。下表同。

表 3 不同闪照次数对木耳浸提液的品质影响

Table 3 Effect of different flash numbers on *L*, *a*, *b* values on the quality of *Auricularia auricula* extract

闪照次数	色度			pH 值	透光率/%
	<i>L</i> 值	<i>a</i> 值	<i>b</i> 值		
0	95.68±0.04 ^a	0.02±0.00 ^d	5.24±0.01 ^d	5.02±0.04 ^a	5.30±0.02 ^a
10	95.72±0.03 ^a	0.10±0.02 ^c	5.25±0.01 ^d	5.11±0.01 ^a	5.35±0.02 ^a
20	95.55±0.01 ^b	0.12±0.01 ^c	5.77±0.02 ^c	5.06±0.05 ^a	5.35±0.02 ^a
30	95.16±0.02 ^c	0.20±0.01 ^a	6.63±0.03 ^b	5.05±0.03 ^a	5.22±0.01 ^b
40	94.60±0.03 ^d	0.18±0.01 ^b	7.36±0.02 ^a	5.03±0.01 ^a	5.20±0.01 ^b

2.3.2 脉冲强光处理对木耳浸提液的品质影响

由表 3 可得脉冲强光处理对 pH 值无显著影响, 而在脉冲强光处理 30 次以后浸提液透光率略微下降, 相比未进行脉冲强光处理组无显著性变化 ($P<0.05$), 可能是由于光照使其中的抗生素等物质结构破坏导致; 经脉冲强光处理 30 次后: ΔL 为-0.52, 表明木耳浸提液的亮度相比原木耳浸提液偏暗, Δa 为+0.18, 表明木耳浸提液偏绿, Δb 为+7.39, 表明木耳浸提液偏黄, 其中 *L* 值、*a* 值、*b* 值相较未进行闪照处理的木耳浸提液均发生了显著性变化 ($P>0.05$), 其总体色度变化 ΔE 为 1.51, 参考色度变化范围 ΔE 在 1~2 之间表现为在淡黄色液体中肉眼可分辨的轻微色泽变暗, 在脉冲强光处理 40 次后的色度变化则更为明显。这与付欣等^[24]研究脉冲光处理后的花生芽情况一致, 使用脉冲强光处理后也使花生芽的色度产生变化, 总体变暗且黄绿度和黄蓝度发生微弱变化; Ignat 等^[25]也运用 0~157.5 kJ/m² 脉冲强光处理苹果切片, 发现低剂量 (17.5 kJ/m²) 脉冲强光照射苹果 7 d 后褐变指数

为 2.2±0.7, 而高剂量 (157.5 kJ/m²) 脉冲强光照射显著加速了苹果的褐变, 光照 7 d 后的苹果褐变指数为 3.6±0.9。

3 结论

采用脉冲强光处理技术, 对鲜木耳脉冲光处理时, 光照距离 5 cm, 抗生素含量在 0.5 mg/kg, 闪照次数在 30 次时可达最理想的降解效果, 恩诺沙星与环丙沙星降解率最高分别可达 82.84%和 81.10%, 脉冲强光处理使鲜木耳的总糖含量约下降 12.25%, 其余理化指标如粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、灰分含量等无显著性变化 ($P<0.05$), 处理后的木耳营养成分仍满足国标要求。同时, 木耳浸提液的处理中脉冲光照距离为 5 cm, 浸提液稀释 5 倍, 含抗生素含量为 0.5 mg/kg, 闪照次数在 30 次时可将两种抗生素分别降解 99.17%和 98.61%; 脉冲强光处理 30 次时对浸提液的色度影响 ΔE 变化为 1.51, 使浸提液相对偏暗, 对其 pH 值、透光率无明显影响。脉冲强光处理可使黑木耳中抗生素

降解81%以上,可使其浸提液中抗生素降解98%以上,可以用于对抗生素的降解处理并有效保证其品质,故而脉冲强光技术不但在杀菌领域有一定优势,也对食用菌的抗生素控制提供了新思路。

参考文献

- [1] Farré M, Pérez S, Kantiani L, et al. Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment [J]. Trends Anal Chem, 2008, 27: 991-1007.
- [2] 郭佩佩,刘海峰,潘明,等.牛奶中氟喹诺酮类抗生素残留检测技术现状分析[J].现代农业装备,2022,43(2):26-30.
- [3] 汤贝贝,张振华,卢信,等.养殖废水中抗生素的植物修复研究进展[J].江苏农业学报,2017,33(1):224-232.
- [4] 王杰,裴斐,李彭,等.不同前处理方法对猪组织中喹诺酮类兽药残留检测效果对比[J].食品科学,2018,39(18):309-314.
- [5] 王蓓.脉冲强光、紫外和红外辐射对稻谷黄曲霉及其毒素的杀灭降解研究[D].镇江:江苏大学,2014.
- [6] Espedito Vassallo, Matteo Pedroni, Tiziana Silveti, et al. Inactivation of *Staphylococcus aureus* by the synergistic action of charged and reactive plasma particles [J]. Plasma Science and Technology, 2020, 22(8): 182-188.
- [7] Preetha P, Pandiselvam R, Varadharaju N, et al. Effect of pulsed light treatment on inactivation kinetics of *Escherichia coli* (MTCC 433) in fruit juices [J]. Food Control, 2020, 121: 107547.
- [8] Moreau M, Lescure G, Agoulon A, et al. Application of the pulsed light technology to mycotoxin degradation and inactivation [J]. Journal of Applied Toxicology, 2013, 33(5): 357-363.
- [9] Leran Wang, Xiaoshuang Liu, RuiCai, et al. Detoxification of ochratoxin A by pulsed light in grape juice and evaluation of its degradation products and safety [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103024.
- [10] 张焕军,王席席,李轶.水体中抗生素污染现状及其对氮转化过程的影响研究进展[J].环境化学,2022,41(4):1168-1181.
- [11] 段培宇,陈寒玉,张宝忠,等.动物源性食品中抗生素类污染生物检测技术研究进展[J].环境化学,2022,41(2):581-590.
- [12] 覃发玠,敖珍,龙俊训,等.黑木耳多糖的提取纯化及生物功能研究进展[J].食品科技,2022,47(2):227-231.
- [13] 杨波,杨浪,周建波.黑木耳的生理活性及加工产品的研究进展[J].现代食品,2020,8:78-81.
- [14] 张科明,梁飞燕,邓鸣,等.QuEChERS 结合液相色谱-串联质谱法快速测定猪肉中多类兽药残留[J].色谱,2016,34(9): 860-867.
- [15] GBT 15672-2009,食用菌中总糖含量测定[S].
- [16] GB 5009.5-2016,食品中蛋白质的测定[S].
- [17] GB 5009.6-2016,食品中脂肪的测定[S].
- [18] GB T5009.10-2003,植物类食品中粗纤维的测定[S].
- [19] GB 5009.4-2016,食品中灰分的测定[S].
- [20] 王龔,郑勇,杨开.脉冲强光在食品杀菌中的应用研究进展[J].中国食品学报,2021,21(9):397-408.
- [21] GhA, Ws B, Cdb C, et al. Sterilization of *Bacillus tequilensis* isolated from aerogenic vinegar by intense pulsed light - science direct [J]. LWT, 2020, 118: 108811.
- [22] Funes G J, P L Gómez, Resnik S L, et al. Application of pulsed light to patulin reduction in McIlvaine buffer and apple products [J]. Food Control, 2013, 30(2): 405-410.
- [23] 周婷婷,曹少谦,李丝丝,等.脉冲强光处理对菜籽油品质的影响[J].中国粮油学报,2019,34(1):57-62,113.
- [24] 付欣,渠皓琳,孙剑,等.脉冲强光处理对花生芽理化指标及白藜芦醇富集的影响[J].食品研究与开发,2022,43(7):24-29.
- [25] Ignat A, Manzocco L, Maifreni M, et al. Surface decontamination of fresh-cut apple by pulsed light: Effects on structure, color and sensory properties [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 91: 122-127.