

# 臭氧和紫外降解面粉中的 DON 及对面粉品质的影响

余以刚, 马涵若, 侯芮, 唐语谦, 肖性龙

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 为降低面粉 DON 含量, 用臭氧及紫外线处理受污染的面粉, 研究处理条件对降解效果的影响, 对比处理后面粉的蛋白含量、湿面筋含量和白度值并通过 MTT 法评价降解产物安全性。研究表明, 在臭氧浓度 45.00 mg/L, 水分含量为 16.00% 的条件下处理 DON 污染面粉 60 min, 初始 DON 含量为 2.35、2.84、4.09 和 4.95 mg/kg 的面粉 DON 降解率分别为 46.59%、40.71%、38.96% 和 35.40%; 在紫外照射强度 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 水分含量 12.00% 的条件下处理 DON 污染面粉 60 min, 相同初始含量的 DON 降解率为 39.89%、40.32%、36.68% 和 30.32%。两种处理后面粉蛋白质含量、湿面筋含量和白度等理化指标均无显著变化 ( $p>0.05$ )。MTT 实验表明: DON 对 LO2 有很强的细胞毒性, 给药 48h 后细胞活性降低 62.02%, 相同 DON 浓度的紫外降解产物使细胞活性降低 17.50%, 臭氧降解产物则使细胞活性仅下降 2% ( $p>0.05$ )。本研究使用的方法可在短时间内有效降低面粉中 DON 含量, 对面粉品质无显著影响, 两种方法的降解产物对 LO2 细胞毒性均显著下降 ( $p<0.01$ )。

**关键词:** 面粉; 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 臭氧降解; 紫外降解; 细胞毒性

文章篇号: 1673-9078(2016)9-196-202

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.9.029

## Degradation of Deoxynivalenol in Flour by Ozone and Ultraviolet Light and their Effects on Flour Quality

YU Yi-gang, MA Han-ruo, HOU Rui, TANG Yu-qian, XIAO Xing-long

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to decrease the deoxynivalenol (DON) content of flour, contaminated flour samples were treated by ozone and ultraviolet (UV) light and the effect of these treatment conditions on DON degradation was studied; the protein content, wet gluten content, and whiteness of flour before and after treatment were compared. Additionally, 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide (MTT) assay was employed to study the cytotoxicity of DON and the degradation products in LO2 cell line. The results showed that when the DON-contaminated flour was treated with 45 mg/L ozone and 16.00% (*m/m*) moisture for 60 min at room temperature, the DON degradation rates for the flour samples with initial DON contents of 2.35, 2.84, 4.09, and 4.95 mg/kg reached 46.59%, 40.71%, 38.96%, and 35.40%, respectively. When the DON-contaminated flour was treated with 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  UV and 12.00% (*m/m*) moisture for 60 min, the DON degradation rates of the above same flour samples reached 39.89%, 40.32%, 36.68%, and 30.32%, respectively. After the two treatments, the protein content, wet gluten content, and whiteness of flour showed no significant difference as compared to those of control group. The results of MTT assay indicated that DON exhibited a strong cytotoxicity on LO2 cells, and the cell viability was reduced by 62.02% after 48 h of DON treatment. The products of UV and ozone degradation with the same initial DON concentration reduced the cell viability by 17.50% ( $p<0.05$ ) and only 2% ( $p>0.05$ ), respectively. DON in the flour could be degraded effectively in a short time using the method described in this study, which showed no significant impact on the flour quality. The degradation products of both the methods exhibited a significantly reduced cytotoxicity to LO2 cells.

**Key words:** flour; deoxynivalenol; ozone degradation; photodegradation; cytotoxicity

脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (Deoxynivalenol, DON) 是一种单端孢霉烯族化合物, 主要由小麦赤霉病病原  
收稿日期: 2015-08-25

基金项目: 粮食公益性科研专项经费项目 (201313005); 广东省科技计划项目 (2013B020311007); 国家自然科学基金面上资助项目 (31271867)

作者简介: 余以刚 (1968-), 男, 教授, 研究方向: 食品安全与检测

通讯作者: 肖性龙 (1977-), 男, 高级工程师, 研究方向: 食品安全与检测

菌禾谷镰刀菌产生。DON 对谷物的污染率和污染水平居镰刀菌毒素之首, 每年有大量的粮食因被 DON 污染而不能食用, 人畜摄入了被 DON 污染的食物会出现厌食、呕吐、白细胞下降和内脏出血等中毒症状<sup>[1]</sup>。1998 年国际癌症研究机构 (IARC) 将 DON 列为第三类致癌物<sup>[2]</sup>。世界卫生组织 (WHO) 将真菌毒素列为食源性疾病的重要根源, 许多国家均规定了食品及饲

料中真菌毒素的限量以保护消费者健康,我国国家标准规定的食品中 DON 最大允许量为  $1 \text{ mg/kg}$ <sup>[3-4]</sup>。2001 在常温常压下会自行分解成氧气,所以几乎不会造成伤害<sup>[5-7]</sup>。国内外学者用臭氧降解农作物中的真菌毒素做过许多研究,处理的农作物包括小麦籽粒、辣椒、玉米、花生、开心果和无花果干等,研究的主要真菌毒素为黄曲霉毒素<sup>[6,8-11]</sup>。近年来紫外照射技术以其二次污染小、对降解体系影响小等优点广泛应用于食品及环境中有害光敏物质的降解和去除,但是在降解谷物中真菌毒素方面的研究还不多<sup>[12]</sup>。

已有研究表明 DON 对人外周血淋巴细胞、胃癌细胞、支气管上皮细胞和结肠腺癌细胞均有很强的细胞毒性,在人体内可能有一定的蓄积但无特殊靶器官<sup>[13-15]</sup>。本文采用噻唑蓝比色法(简称 MTT 法)研究 DON 及其臭氧和紫外降解产物对体外培养的人正常肝细胞(LO2)细胞活性的影响以评价其降解产物的安全性。本文拟研究臭氧和紫外降解面粉中 DON 的效果,分析处理后面粉基本理化值,并通过人体正常肝细胞(LO2)的 MTT 实验研究 DON 降解产物的安全性。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

四种不同 DON 含量的面粉样品(编号为 1#、2#、3#和 4#),受赠于河南工业大学粮油与食品学院;LO2 细胞株受赠于中山大学生物学院;脱氧雪腐镰刀菌烯醇标准品购于新加坡 Pribolab 公司;呕吐毒素酶联免疫试剂盒购于 Romer 公司;色谱级甲醇、乙腈购于美国 Honeywell 公司;DMEM 完全培养基、胎牛血清购于美国 Gibco 公司;96 孔板、T75 透气瓶购于美国 Corning 公司;DMSO、MTT 购于美国 Sigma 公司;双抗(青链霉素)购于中国索莱宝公司。

### 1.2 主要仪器设备

全自动凯氏定氮仪 Kjeltac 8400(瑞典 FOSS 公司);COM-AD-01 臭氧发生仪(鞍山安思罗斯环保有限公司);254 nm 石英紫外灯(广东雪莱特光电科技股份有限公司);QYN100-2 氮吹仪(上海乔跃电子有限公司);371 二氧化碳细胞培养箱、生物安全柜、酶标仪(美国 Thermo 公司);SBDY-1 数显白度仪(上海悦丰仪器仪表有限公司)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 臭氧熏蒸降解面粉中 DON

年美国 FDA 有批准臭氧作为抑菌剂可以直接应用于食品工业,臭氧本身有特殊臭味且化学性质不稳定,

取 50 g 面粉置于 500 mL 圆底烧瓶中,臭氧气体自磨口玻璃塞通入烧瓶,隔 5 min 震荡一次,尾气引入装有碘化钾溶液的尾气瓶。通过调节臭氧发生器转换率改变臭氧浓度,探究不同处理时间、不同臭氧浓度、面粉不同水分含量和不同 DON 初始浓度对降解效果的影响。

#### 1.3.2 紫外照射降解面粉中 DON

取 50 g 面粉用 40 目筛均匀铺撒在 40 cm×60 cm 铁盘上,置于一个顶端悬挂 254 nm 紫外灯的密封暗箱中。通过改变样品和石英紫外灯之间的距离改变紫外照射强度,探究不同照射时间、不同照射强度、不同面粉水分含量和不同 DON 初始浓度对面粉中 DON 降解效果的影响。

#### 1.3.3 面粉理化性质测定

水分按照 GB/T 21305-2007《谷物及谷物制品水分的测定常规法》进行,蛋白质含量按照 GB 5009.5-2010《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》进行,湿面筋含量按照 GB/T 5506.2-2008《小麦和小麦粉面筋含量第 2 部分:仪器法测定湿面筋》进行,面粉白度按照 SBDY-1 数显白度仪说明书测定。

#### 1.3.4 DON 含量检测

DON 含量检测按照 Romer 呕吐毒素酶联免疫试剂盒说明书进行。

#### 1.3.5 MTT 法测细胞活性

LO2 细胞在透气培养瓶中用 DMEM 完全培养基在 37 °C,5% CO<sub>2</sub> 条件下培养至对数期。将处于对数期的细胞按照  $1 \times 10^4$ /孔密度接种到 96 孔板中,在 37 °C,5% CO<sub>2</sub> 条件下培养 4~6 小时,待细胞充分贴壁后,实验组去掉培养基,将经过 DMEM 完全培养基稀释的不同浓度 DON 标准品溶液和相应浓度的臭氧降解产物、紫外降解产物溶液加到 96 孔板中,空白组不处理,培养 48 h 后去掉培养基,加入 20 μL 浓度为 5 mg/mL 的 MTT 溶液在 37 °C 下反应 4 h,待结晶充分形成后加入 150 μL DMSO 溶解,避光振荡 15 min 后将 96 孔板放入酶标仪在 570 nm 处检测光密度 OD 值。

$$\text{细胞活性} = \frac{\text{实验组 OD 值}}{\text{空白组 OD 值}} \times 100\%$$

#### 1.3.6 数据计算和分析

每个样品做 3~6 个平行,用 Origin 8 和 IBM SPSS Statistics 19.0 对数据进行统计分析。

## 2 结果与讨论

## 2.1 面粉样品

四种面粉样品中 DON 含量和基本理化指标见表 1, 其中 DON 含量均超过了国家标准规定的最高限量 (1 mg/kg); 随着样品 DON 含量的增加蛋白质含量、湿面筋含量和白度值都随之降低, 这可能是由于污染严重的小麦制得的面粉 DON 含量高, 赤霉病使小麦

品质下降, 蛋白质等营养物质含量降低, 与蛋白质含量相关的湿面筋含量也随之降低, 且赤霉病小麦籽粒小、质量轻、表皮皱缩, 其中空麦、瘪麦多, 制粉过程中容易混入更多碎麸星使得面粉颜色较深, 同时赤霉病小麦中异色麦粒比例较高, 也会使制得的面粉颜色较深<sup>[1]</sup>。

表 1 样品初始 DON 含量和理化指标

Table 1 Initial DON content and physicochemical properties of samples

样品	DON 含量/(mg/kg)	水分含量/%	蛋白质含量/%	湿面筋含量/%	白度值
1#	2.35±0.08 <sup>d</sup>	12.35±0.25 <sup>b</sup>	10.89±0.24 <sup>a</sup>	26.59±0.28 <sup>a</sup>	81.14±3.37 <sup>a</sup>
2#	2.84±0.16 <sup>c</sup>	13.45±0.08 <sup>a</sup>	10.02±0.07 <sup>b</sup>	25.67±0.30 <sup>b</sup>	78.81±2.26 <sup>a</sup>
3#	4.09±0.09 <sup>b</sup>	11.99±0.34 <sup>bc</sup>	9.92±0.18 <sup>b</sup>	25.41±0.21 <sup>b</sup>	77.75±1.87 <sup>a</sup>
4#	4.95±0.04 <sup>a</sup>	11.47±0.13 <sup>c</sup>	9.95±0.11 <sup>b</sup>	25.15±0.45 <sup>b</sup>	76.57±3.34 <sup>a</sup>

注: 用 Duncan 法进行多重比较, 同列标有不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

## 2.2 臭氧熏蒸降解面粉中 DON

### 2.2.1 臭氧处理时间对 DON 降解效果的影响

取 500 g 面粉样品 4#, 将水分含量调整至 12.00%, 调整臭氧发生仪使臭氧浓度为 60.00 mg/L, 流速为 1 L/min, 分别处理面粉样品 10、30、60、120、180 和 300 min。如图 1 所示, 面粉中 DON 降解率随着处理时间的延长而升高。处理时间达到 60 min 时降解率为 31.62%, 进一步延长处理时间, 降解率无显著变化 ( $p > 0.05$ )。表明到 60 min 时, 臭氧对 DON 的氧化降解反应逐渐达到了平衡, 为了提高臭氧利用率, 本实验选择处理时间为 60 min 来进行接下来的研究。

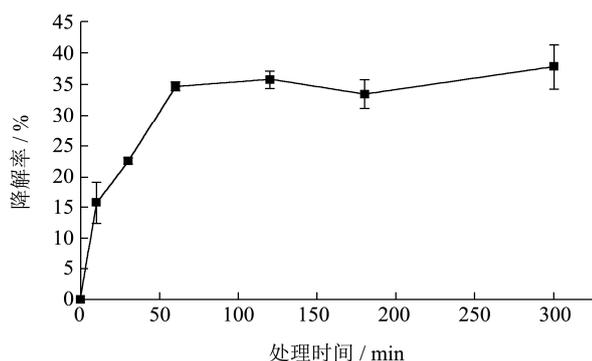


图 1 臭氧处理时间对 DON 降解效果的影响

Fig.1 Effect of exposure time on the degradation rate by ozone

### 2.2.2 臭氧浓度对 DON 降解效果的影响

取 500 g 面粉样品 4#, 将面粉水分含量调整至 12.00%, 分别用 15.00、30.00、45.00 和 60.00 mg/L 臭氧以 1 L/min 流速处理 60 min, 如图 2 所示, 随着臭氧浓度的升高, DON 降解率明显提高。臭氧浓度达到 45.00 mg/L 时, 降解率为 29.42%, 将臭氧浓度提升至 60.00 mg/L 降解率无显著变化 ( $p > 0.05$ ) (经 SPSS

分析确认, 此处  $p = 0.086$ ), 说明臭氧浓度达 45.00 mg/L 时降解反应逐渐趋于平衡, 因此选择臭氧浓度 45.00 mg/L 来进行后续试验。

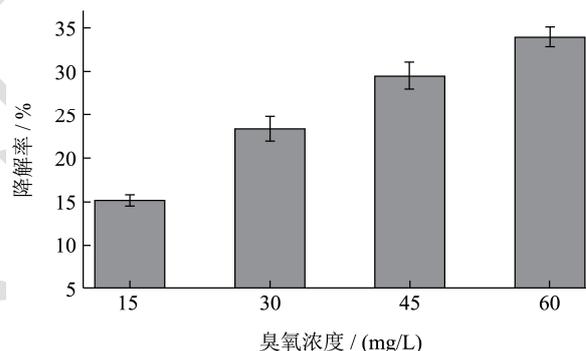


图 2 臭氧浓度对 DON 降解效果的影响

Fig.2 Effect of ozone concentration on the degradation rate

### 2.2.3 面粉水分含量对 DON 臭氧降解效果的影响

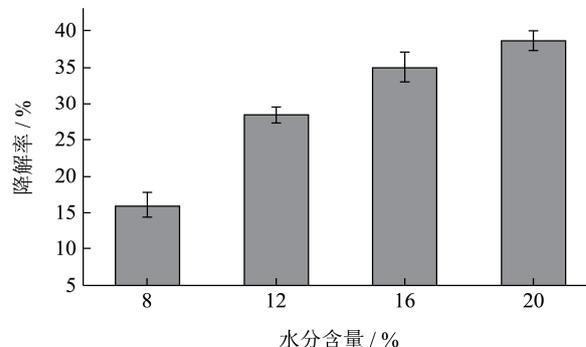


图 3 样品水分含量对臭氧降解 DON 效果的影响

Fig.3 Effect of moisture content of samples on the degradation rate by ozone

取 500 g 面粉样品 4#, 将其水分含量分别调整为 8.00%、12.00%、16.00% 和 20.00%。控制臭氧浓度为

45.00 mg/L, 流速为 1 L/min, 处理时间 60 min。如图 3 所示, 随着面粉水分含量的提高, DON 降解率升高, 说明较高的水分含量有利于 DON 的降解, 与 Li M M 等的研究结果一致<sup>[6]</sup>。水分含量为 16.00%时降解率为 34.90%, 再提高面粉的水分含量, 降解率无显著提升 ( $p>0.05$ )。Si-chu X<sup>[16]</sup>等认为臭氧具有强氧化性, 作用于水分子后能释放出单原子氧和羟基等活性离子, 从而将不饱和有机物氧化降解。样品水分含量较高时, 受到相同浓度的臭氧作用产生的活性离子较多, 有利于 DON 的降解, 但是当水分含量进一步提升时, 在振荡过程中水分含量高的面粉容易形成粉团, 阻碍了臭氧与面粉的充分接触; 同时随着水分含量的升高, 也会增强面粉中其他组分与臭氧发生反应的机会, 与 DON 竞争活性离子。由于较低的水分含量有利于面粉的储存, 所以选择水分含量 16.00%进行后续试验。

### 2.2.4 不同 DON 初始含量对臭氧降解效果的影响

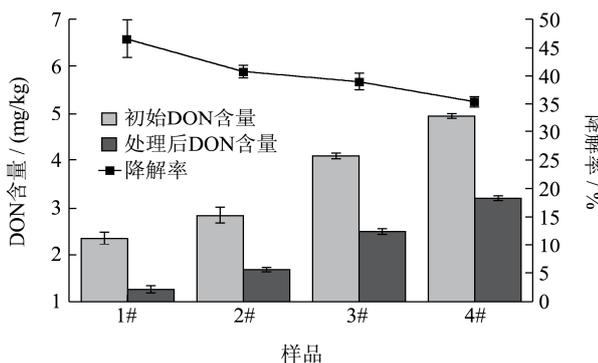


图4 样品 DON 初始含量对臭氧降解效果的影响

Fig.4 Effect of initial DON concentration on the degradation rate by ozone

取面粉样品 1#、2#、3#和 4#各 100 g, 将其水分含量调整至 16.00%。控制臭氧浓度为 45.00 mg/L, 流速 1 L/min, 处理时间为 60 min。如图 4 所示, 四种不同 DON 含量的面粉样品经过处理降解率都可以达到 35%以上, 初始含量低的样品降解率较高。Li M M 等<sup>[6]</sup>的研究中初始 DON 含量为 2.68 mg/kg 和 10.06 mg/kg, 水分含量为 16.60%和 16.76%的小麦籽粒经过 80 mg/L 的臭氧处理 2 h 后 DON 降解率分别为 38.15% 和 35.40%。在该研究中使用的原料是小麦籽粒, 前人研究表明<sup>[17]</sup>麸皮中毒素含量最高, 经过制粉分离后麸皮中 DON 含量是小麦原始含量的 2.7 倍, 仅有约 29% DON 存在于面粉中, 因此有理由认为在小麦籽粒中大多数 DON 集中在表面, 且麸皮组成成分简单, 籽粒状态不易形成团阻碍臭氧的充分扩散, 小麦籽粒中的 DON 更易被降解, 但是由于文中没有指出臭氧流速和物料质量与反应容器的比值, 无法分析具体原因, 因

此除臭氧浓度、处理时间和样品水分含量之外不同物料的表面特性和物料质量与反应容器的比值也有可能成为影响臭氧对 DON 降解效果的因素。

### 2.3 紫外照射降解面粉中 DON

#### 2.3.1 紫外照射时间对 DON 降解效果的影响

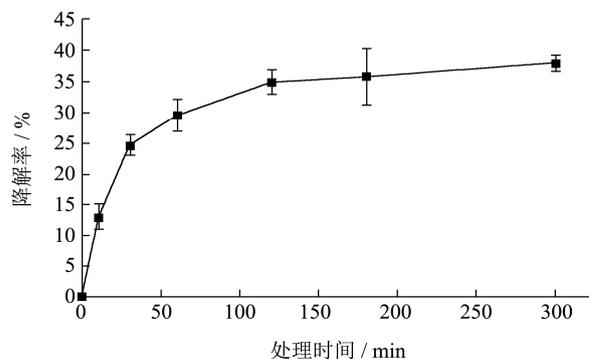


图5 处理时间对紫外降解效果的影响

Fig.5 Effect of exposure time on the degradation rate by UV

取 500 g 面粉样品 4#, 将其水分含量调整为 12.00%。调整盛放样品的铁盘和石英紫外灯之间的垂直距离, 使样品处的紫外照射强度为 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。分别处理样品 10、30、60、120、180 和 300 min。如图 5 所示, 紫外照射可以有效降解面粉中的 DON, 当处理时间为 60 min 时, DON 降解率达到 29.56%, 再延长处理时间降解率无显著变化 ( $p>0.05$ )。小麦籽粒在磨制成面粉的过程中一部分麸皮表面积累的 DON 会侵染到面粉中, 紫外线降解真菌毒素的过程可能是由光化学反应产生的游离基引发的链式反应, 紫外光的波长越短能量就越大, 同时其穿透能力就越差, 面粉中的 DON 很难完全暴露于紫外光<sup>[12]</sup>。可认为处理时间为 60 min 时降解反应逐渐达到平衡。所以选择处理时间为 60 min 进行后续试验。

#### 2.3.2 紫外照射强度对 DON 降解效果的影响

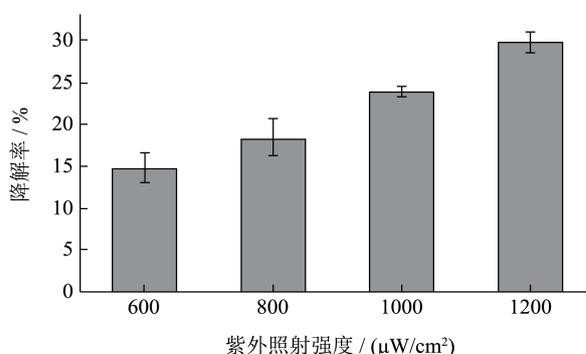


图6 紫外照射强度对 DON 降解效果的影响

Fig.6 Effect of UV intensities on the DON degradation rate

取 500 g 面粉样品 4#, 将其水分含量调整为 12.00%。调整样品和石英紫外灯之间的距离, 分别在

600、800、1000 和 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  照射强度下照射 60 min。如图 6 所示 DON 降解率随着照射强度的增强显著升高 ( $p < 0.05$ ), 在照射强度为 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  时降解率最高, 达到 29.70%, 因此本实验选择 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的照射强度进行后续实验。有研究<sup>[18]</sup>认为由于设置不同的紫外照射强度是通过调节样品与石英紫外灯之间的距离实现的, 样品距离紫外灯的距离越近照射强度越强, 但是随着距离缩短, 样品受到的紫外直射面积也会减小, 因此照射强度较高时, 真菌毒素的实际降解率应高于计算值。(降解率一直在增加, 请解释没有做超过 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的照射强度的实验)(解释: 受限于实验条件)。

### 2.3.3 面粉水分含量对 DON 紫外降解效果的影响

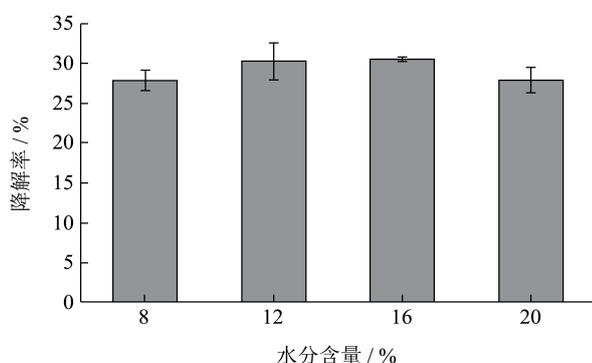


图 7 样品水分含量对紫外降解效果的影响

Fig.7 Effect of moisture content of samples on the degradation rate by UV

取 500 g 面粉样品 4#, 分别将其水分含量调整至 8.00%、12.00%、16.00%和 20.00%, 控制紫外照射强度为 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  处理 60 min。如图 7 所示四种不同水分含量样品紫外降解效果无显著差异 ( $p > 0.05$ ), 本次试验选择的水分含量范围对降解效果影响不大, 由于高水分含量不利于面粉的保存, 本实验选择最接近四种面粉样品原始水分含量的 12.00%进行后续实验。

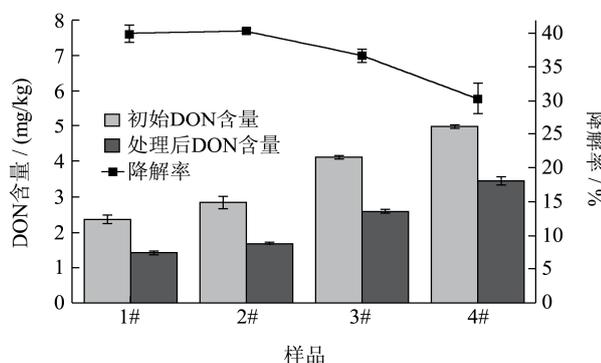


图 8 样品 DON 初始含量对紫外降解效果的影响

Fig.8 Effect of initial DON concentration on the degradation rate by UV

### 2.3.4 不同 DON 初始含量对紫外降解效果的影响

取面粉样品 1#、2#、3#和 4#各 100 g, 将其水分含量调整至 12.00%, 在 1200  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的紫外照射强度下处理 60 min。如图 8 所示, 四种不同 DON 初始含量的样品经过处理后降解率都可以达到 30%以上, 初始 DON 含量较低的样品降解率较高。

## 2.4 臭氧熏蒸和紫外照射对面粉基本理化指标的影响

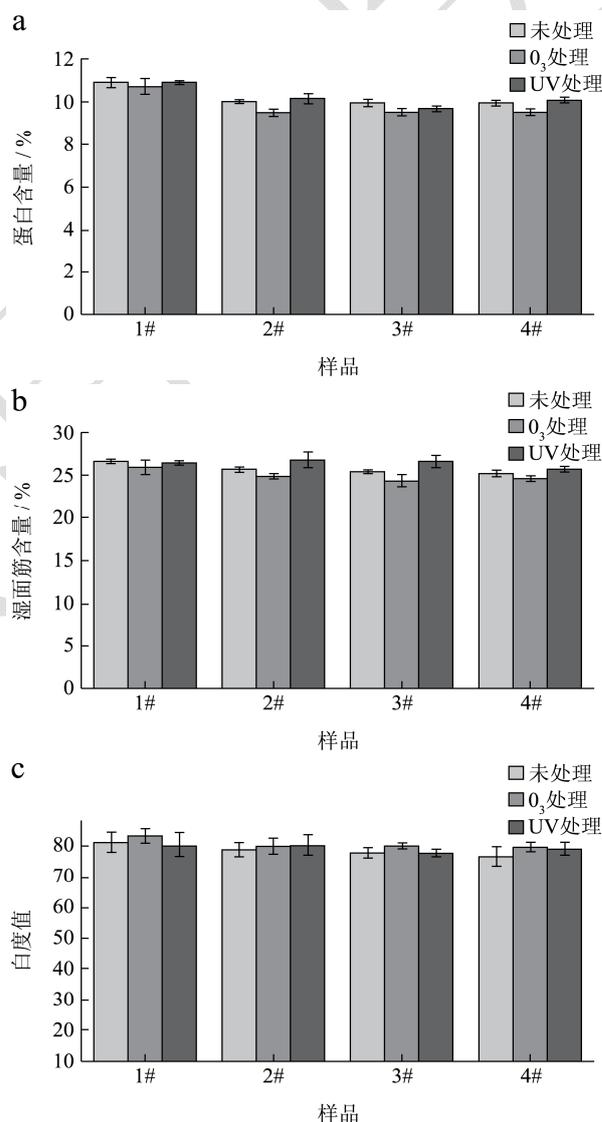


图 9 处理前后面粉理化指标

Fig.9 Physicochemical indicators of flour before and after treatment

注: a, 蛋白含量; b, 湿面筋含量; c, 白度值。

本实验从处理后面粉蛋白质含量、湿面筋含量和面粉白度的变化来研究臭氧和紫外处理对面粉品质的影响。如图 9 所示, 经过臭氧处理后面粉的蛋白含

量和湿面筋含量略有下降,白度值略有上升,这可能是由于臭氧具有强氧化性,一部分蛋白质被氧化,与之相关的湿面筋含量也随之下降,面粉中的碎麸皮和类胡萝卜素、叶黄素等一些有色物质被漂白因而面粉白度有所提高;紫外处理后面粉蛋白质含量和白度值基本不变,但湿面筋含量略有升高,这可能是在紫外照射处理的过程中,一些蛋白质的结构发生了变化,导致蛋白质持水量增加<sup>[7]</sup>。但是经过显著性检验,这些变化均不显著 ( $p>0.05$ ),说明本处理方法对面粉的基本理化指标无显著影响。

### 2.5 DON 降解产物的细胞毒性

将 20  $\mu\text{g/mL}$  的 DON 甲醇溶液分别置于 50 mL 平底烧瓶和石英比色皿中,平底烧瓶连接臭氧发生仪在 45.00 mg/L,流速 1 L/min 的臭氧条件下处理 60 min 分钟后用甲醇洗出(经检测, DON 无检出);石英比色皿经密封后置于暗箱中,在 1200  $\mu\text{W/cm}^2$  的紫外照射强度下处理 60 min 后用甲醇洗出(经检测, DON 无检出)。两种液体经氮吹仪吹干, DMSO 复溶后用 DMEM 完全培养基稀释至不同浓度备用。

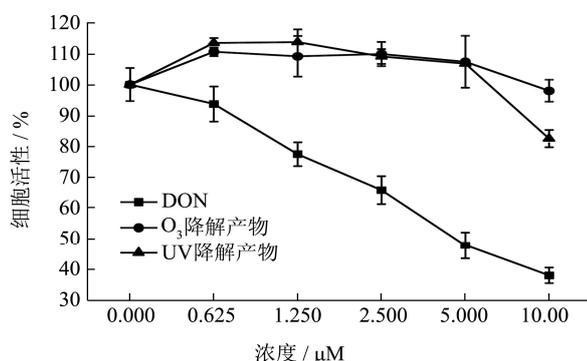


图 10 不同浓度 DON 和臭氧及紫外降解产物对 LO2 细胞活性的影响

Fig.10 Effect of different DON concentrations and the products from ozone and UV degradation with the same initial concentration on LO2 cell viability determined by MTT assay

0.625、1.25、2.50、5.00 和 10.00  $\mu\text{M}$  (培养基中最终浓度, DMSO<0.1%) 的 DON 毒素标准品和对应浓度的臭氧及紫外降解产物给药 48 h 后 LO2 细胞的细胞活性如图 10 所示。与空白相比, DON 作用 48 h 后 LO2 细胞活性随着给药浓度的增加显著降低 ( $p<0.01$ ), 浓度为 10.00  $\mu\text{M}$  时细胞活性降低了 62.02%, 而 10.00  $\mu\text{M}$  的臭氧降解产物作用 48 h 后细胞活性仅降低了 2%, 与空白组无显著差异 ( $p>0.05$ ), 10.00  $\mu\text{M}$  的紫外降解产物作用 48 h 后细胞活性降低了 17.50%。两种降解产物与相同浓度的 DON 相比细胞毒性显著降低, 在 0~10.00  $\mu\text{M}$  浓度范围内臭氧降解

产物对 LO2 细胞已无毒性, 紫外降解产物在浓度大于 5  $\mu\text{M}$  后表现出弱毒性。

### 3 结论

3.1 臭氧和紫外均可以有效降解面粉中的 DON 含量, 优化出的臭氧处理条件是面粉水分含量 16.00%, 臭氧浓度 45.00 mg/L, 处理时间 60 min, 在此条件下 DON 初始含量为 2.35~4.95 mg/kg 的面粉中 DON 降解率均可达到 35% 以上; 紫外处理条件是面粉水分含量 12.00%, 紫外照射强度 1200  $\mu\text{W/cm}^2$ , 处理时间 60 min, 在此条件下 DON 初始含量为 2.35~4.95 mg/kg 的面粉中 DON 降解率均可达到 30% 以上。处理后面粉主要理化指标无显著变化。

3.2 浓度为 45.00 mg/L 的臭氧直接作用于 20  $\mu\text{g/mL}$  DON 标准品溶液 60 min 以及 254 nm 紫外线在 1200  $\mu\text{W/cm}^2$  照射强度下直接照射 20  $\mu\text{g/mL}$  DON 标准品溶液 60 min 均可将 DON 完全降解。DON 对 LO2 细胞有很强的细胞毒性, 与未经处理的细胞相比, DON 作用 48 h 后细胞活性随给药浓度的增加显著降低 ( $p<0.01$ ), 浓度为 10.00  $\mu\text{M}$  时细胞活性降低了 62.02%, 而相同浓度的紫外降解产物作用 48 h 后细胞活性降低了 17.50% ( $p<0.05$ ), 相同浓度的臭氧降解产物作用 48 h 后细胞活性仅降低了 2% ( $p>0.05$ )。两种途径的降解产物与相同浓度的 DON 相比对 LO2 细胞的细胞毒性均显著降低 ( $p<0.01$ ), 臭氧降解产物对 LO2 细胞已无毒性。

### 参考文献

- [1] 封薇. 小麦中镰刀菌毒素污染和脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON) 积累分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010  
FENG Wei. Analysis of *Fusarium* mycotoxin contamination and DON accumulation in wheat [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2010
- [2] Santos J S D, Souza T M, Ono E Y S, et al. Natural occurrence of deoxynivalenol in wheat from Paraná State, Brazil and estimated daily intake by wheat products [J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 90-95
- [3] 李向丽, 谭贵良, 梁波, 等. 多功能柱净化-超高效液相色谱串联质谱法同时测定水产品中 11 种真菌毒素[J]. 现代食品科技, 2015, 16: 10  
LI Xiang-li, TAN Gui-liang, LIANG Bo, et al. Simultaneous detection of 11 mycotoxins in aquatic products by multifunctional column clean-up and ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 16: 10

- [4] GB 2761-2011,食品中真菌毒素限量[S]  
GB 2761-2011, Maximum Level of Mycotoxins of Food [S]
- [5] K S, McKenzie, A B, Sarr, K, Mayura, et al. Oxidative degradation and detoxification of mycotoxins using a novel source of ozone [J]. *Food & Chemical Toxicology*, 1997, 35(8): 807-820
- [6] Li M M, Bian E Q G K. Effect of ozone treatment on deoxynivalenol and quality evaluation of ozonised wheat [J]. *Food Additives & Contaminants Part A Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2014, 32: 1-10
- [7] Zsuzsanna László, Zsuzsanna Hovorka-Horváth, Sándor Beszédes, et al. Comparison of the effects of ozone, UV and combined ozone/UV treatment on the color and microbial counts of wheat flour [J]. *Ozone Science & Engineering*, 2008, 30(6): 413-417
- [8] 张芳. 真菌毒素臭氧降解及其他脱毒方法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014  
ZHANG Fang. The research of ozone degradation mycotoxin and other detoxification methods [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014
- [9] Inan F, Pala M, Doymaz I. Use of ozone in detoxification of aflatoxin B<sub>1</sub> in red pepper [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2007, 43(4): 425-429
- [10] Prudente Jr A D. Evaluation of aflatoxin-related products from ozonated corn [D]. Baton Rouge: Louisiana State University, 2008
- [11] Akbas M Y, Ozdemir M. Effect of different ozone treatments on aflatoxin degradation and physicochemical properties of pistachios [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(13): 2099-2104
- [12] 刘睿杰. 黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 在不同介质中紫外降解机理及安全性评价[D]. 无锡: 江南大学, 2011  
LIU Rui-jie. Photodegradation mechanisms and safety evaluation of aflatoxin B<sub>1</sub> [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011
- [13] Kouadio J H, Mobio T A, Baudrimont I, et al. Comparative study of cytotoxicity and oxidative stress induced by deoxynivalenol, zearalenone or fumonisin B<sub>1</sub> in human intestinal cell line Caco-2 [J]. *Toxicology*, 2005, 213(1): 56-65
- [14] 邢欣, 刘静, 邢凌霄, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇对胃癌细胞增殖及细胞周期的影响[J]. *中国细胞生物学学报*, 2007, 29(5): 729-735  
XING Xin, LIU Jing, XING Ling-xiao, et al. Effects of deoxynivalenol on proliferation and cell cycle distribution of human gastric carcinoma cell line [J]. *Chinese Journal of Cell Biology* 2007, 29(5): 729-735
- [15] Lewis C W, Smith J E, Anderson J G, et al. Increased cytotoxicity of food-borne mycotoxins toward human cell lines in vitro via enhanced cytochrome p450 expression using the MTT bioassay [J]. *Mycopathologia*, 2000, 148(2): 97-102
- [16] Si-chu X, Ming-hao S U I, Chun-yan Z H U. Ozonation rule for organic pollutants in water and its methodology of kinetics study [J]. *Sichuan Environment*, 2010, 6: 029
- [17] 陈飞. 加工工艺去除小麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇 (DON) 的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012  
CHEN Fei. Study on the reduction of deoxynivalenol (DON) during the wheat processing [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2012
- [18] 沈祥震. 花生油中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 紫外降解及安全性评价[D]. 济南: 山东农业大学, 2014  
SHEN Xiang-zhen. UV-irradiation detoxification and safety evaluation of aflatoxin B<sub>1</sub> in peanut oil [D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2014
- [19] 李萌萌. 赤霉病小麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇降解技术研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013  
LI Meng-meng. Research on technology of degradation of deoxynivalenol in wheat of fusarium head blight [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013
- [20] 张昆. 电子束辐照对赤霉病小麦脱氧雪腐镰刀菌烯醇降解效果的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014  
ZHANG Kun. Research on electron beam irradiation on degradation of deoxynivalenol on scab wheat [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014