

辉光放电等离子体降解啤酒中 T-2 毒素

Study on the degradation of T-2 toxin in beer by glow discharge plasma

王小博¹ 刘健南¹ 郑琳¹

WANG Xiaobo¹ LIU Jiannan¹ ZHENG Lin¹

陈冰冰¹ 冯泽君¹ 邓旗²

CHEN Bingbing¹ FENG Zejun¹ DENG Qi²

(1. 佛山职业技术学院, 广东 佛山 528137; 2. 广东海洋大学食品科技学院, 广东 湛江 524088)

(1. Foshan Polytechnic, Foshan, Guangdong 528137, China; 2. School of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong 524088, China)

摘要:目的:探讨辉光放电等离子体(GDP)降解啤酒中 T-2 毒素的最佳工艺及对啤酒理化指标的影响。方法:通过 Box-Behnken 方法进行四因素三水平的响应面优化试验,确定啤酒中 T-2 毒素的最佳降解条件。结果:当放电电压为 570 V,作用时间为 18 min,放电电流为 99 mA, T-2 毒素初始质量浓度为 8.5 $\mu\text{g/mL}$ 时, T-2 毒素降解效率最高(89.21%);经 GDP 处理后,啤酒泡持性显著降低($P<0.05$),其他指标无明显变化。结论:通过响应面优化模型获得的 GDP 最佳降解条件可以用于啤酒中 T-2 毒素的降解;GDP 处理能够影响啤酒泡持性,但对其他指标无明显影响。

关键词:辉光放电等离子体;降解;啤酒;T-2 毒素

Abstract: **Objective:** Exploring the optimal process for the degradation of T-2 toxin in beer by glow discharge plasma(GDP) and its impact on the physicochemical indicators of beer. **Methods:** Based on single-factor experiments, a response surface optimization experiment with four factors and three levels was conducted using the Box Behnken method to determine the optimal degradation conditions for T-2 toxin in beer. **Results:** When the discharge voltage was 570 V, the action time was 18 minutes, the discharge current was 99 mA, and initial concentration of T-2 toxin was 8.5 $\mu\text{g/mL}$. Under the control of these conditions, the degradation efficiency of the T-2 toxin was

the highest (89.21%). After GDP treatment, the physical and chemical indicators of beer were tested, and the results showed a significant decrease in beer foam retention ($P<0.05$), while other indicators remained unchanged. **Conclusion:** The optimal degradation conditions of GDP obtained by the response surface optimization model are accurate and reliable, which can be used for the degradation of T-2 toxin in beer. GDP can affect the brewing ability of beer, but it will not have a significant impact on other indicators.

Keywords: glow discharge plasmas; degradation; beer; T-2 toxin

T-2 毒素是由镰孢菌属真菌产生的一种次级代谢产物,是毒性最强的一种 A 型单端孢霉烯族化合物毒素。其在自然界中分布广泛,常常污染粮谷类产品及其制品,在大麦、小麦、玉米等粮农作物以及动物饲料中污染率高达 80% 以上^[1]。徐哲等^[2]研究发现,180 份中国小麦样品中镰刀菌毒素检出率高达 95%。T-2 毒素具有很强的致毒效应,机体长期低剂量摄入可导致血液及淋巴系统受到侵害,造成内分泌紊乱及免疫功能下降等,严重影响人类健康^[3-5]。广东省年平均气温较高、湿度较大,粮谷作物在放置过程中极易发霉变质,产生真菌毒素,尤其是大麦、小麦变质后极易产生 T-2 等真菌毒素。

辉光放电等离子体(glow discharge plasma, GDP)是一种新型的、绿色环保的电化学高级氧化技术,也是一种能够在水溶液中通过直流放电产生等离子体的非热处理技术^[6-7]。GDP 是指在封闭的容器内施加一定的电场促使其不断产生具有强氧化性的高活性粒子($\cdot\text{OH}$ 、 $\text{H}_2\text{O}\cdot$ 、 H_2O_2 等),溶液中的有机物在光、电等媒介下可与生成的高活性粒子发生反应,并最终彻底分解为 CO_2 、 H_2O 和简单无机盐,具有降解效率高、能耗低、操作简单、不产生二次污染等特点^[8],已被广泛应用于水体中有机

基金项目:广东省高等学校自然科学研究特色创新项目(编号:2020KTSCX307);广东省普通高校创新团队项目(编号:2021KCXTD081);佛山职业技术学院课程思政示范课程项目(编号:2023SZKC-014);佛山职业技术学院质量工程项目(编号:2022KC-004)

作者简介:王小博,男,佛山职业技术学院讲师,硕士。

通信作者:郑琳(1967—),女,佛山职业技术学院教授,硕士。

E-mail:751399230@qq.com

收稿日期:2023-05-08 **改回日期:**2024-03-09

污染物的消解^[9],但将其用于啤酒中 T-2 毒素的降解及其对啤酒品质影响的研究尚未见报道。研究拟构建 GDP 降解装置,考察 GDP 条件对啤酒中 T-2 毒素的降解效果,探讨 GDP 降解 T-2 毒素的最佳工艺条件;并分析 GDP 对啤酒理化指标的影响,为 GDP 脱除食品中真菌毒素的研究与应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

T-2 毒素标准品:纯度 $\geq 98\%$,上海颖心实验室;

甲醇、乙腈:色谱纯,纯度 $\geq 99.9\%$,南京化学试剂股份有限公司;

甲酸、乙酸乙酯:分析纯,天津光复试剂有限公司;

乙酸铵:阿拉丁试剂(上海)有限公司;

青岛啤酒:市售。

1.2 仪器与设备

辉光放电降解装置:实验室自主构建(图 1);

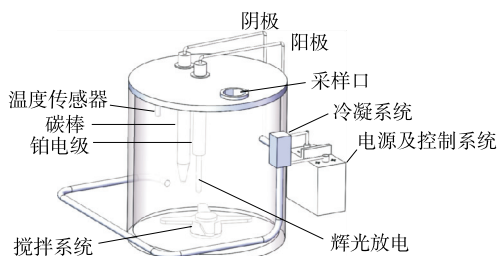


图 1 辉光放电降解装置结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of the structure of the glow discharge degradation device

超高效液相色谱—三重四极杆质谱联用仪:TSQ Quantiva 型,美国 Thermo Fisher 公司;

电子天平:FA1104A 型,上海精天电子仪器有限公司;

涡旋震荡仪:Vortex 2 型,德国 IKA 公司;

冷冻离心机:KT7-900-429 型,新加坡 KENTA 公司;

氮吹仪:YT-D24 型,山东云唐智能科技有限公司;

超声波提取器:KQ-800B 型,昆山舒美超声仪器有限公司;

全自动啤酒分析仪:5611 型,长沙市驭仪电子科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 含 T-2 毒素样品的制备 取 10 mg T-2 毒素标准品,用乙腈溶解、定容配制质量浓度为 100 $\mu\text{g/mL}$ 的 T-2 毒素标准储备液。分别取 0, 1, 3, 5, 7, 10 mL 标准储备液于 100 mL 容量瓶中,啤酒定容,得到质量浓度分别为 0, 1, 3, 5, 7, 10 $\mu\text{g/mL}$ 的含 T-2 毒素的啤酒溶液。

1.3.2 GDP 降解啤酒中 T-2 毒素工艺参数优化

(1) 单因素试验:取 10 mL 含 T-2 毒素的啤酒于反应器中,在基础条件(电压 550 V, 时间 15 min, 电流

100 mA, T-2 毒素初始质量浓度 5 $\mu\text{g/mL}$)下分析 GDP 装置放电电压、作用时间、放电电流和 T-2 毒素初始质量浓度对 T-2 毒素降解效率的影响。其中,放电电压为 400, 450, 500, 550, 600 V, 作用时间为 1, 3, 5, 7, 10 min, 放电电流为 5, 10, 15, 20, 25 mA, T-2 毒素初始质量浓度为 1, 3, 5, 7, 10 $\mu\text{g/mL}$ 。每组试验重复 3 次,测定并计算 T-2 毒素降解率。

(2) 响应面试验:在单因素试验基础上,采用 Design-Expert 8.06 软件的 Box-Behnken 设计原对 GDP 降解啤酒中 T-2 毒素的参数进行四因素三水平的响应面优化。

1.3.3 T-2 毒素降解率测定 参照 Tahoun 等^[10]的方法并修改。T-2 毒素标准曲线为 $y = 207.9x + 330.62$, $R^2 = 0.9992$ 。按式(1)计算 T-2 毒素降解率。

$$R = \frac{C_0 - C_T}{C_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R ——T-2 毒素降解率, %;

C_0 ——T-2 毒素初始质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

C_T ——经 GDP 降解后 T-2 毒素的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$ 。

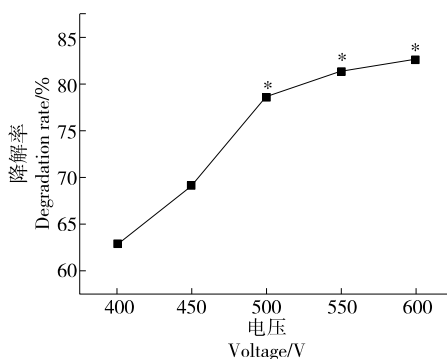
1.3.4 GDP 对啤酒理化指标的影响 取 10 mL 啤酒于反应器内,以响应面优化得到的参数为试验条件,对啤酒进行 GDP 处理。GDP 处理后,采用啤酒全自动分析仪器法^[11]分别测定啤酒的酒精度、色度、pH、原麦汁浓度、浊度、泡持性、总酸度、双乙酰、苦味值等^[12]。

1.3.5 数据处理 采用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析,采用 Origin 8.5 软件绘图,采用 Design-Expert. V 8.0.6 软件进行响应面分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 放电电压 由图 2 可知, GDP 放电电压与 T-2 毒素降解率呈正比,随着放电电压的增加, T-2 毒素降解率也随之增加;当放电电压为 500~600 V 时, T-2 毒素降解率逐渐趋于平缓;与 400, 450 V 相比,放电电压为 500,



* 表示组内比较差异显著 ($P < 0.05$)

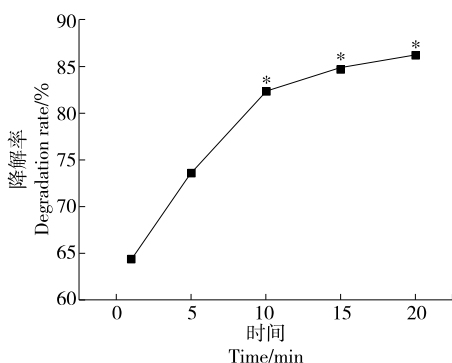
图 2 放电电压对降解率的影响

Figure 2 Effects of discharge voltage on degradation rate

550,600 V 时,T-2 毒素降解率增加显著($P<0.05$)。放电电压对活性粒子($\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{H}$ 、 H_2O_2)的产生有显著影响,当放电电压较低时,阴极发射的电子在电场中加速获取的能量较低,从而与阳极尖端气态水分子发生碰撞,激发气态水分子发生电离产生的活性粒子较少,最终导致等离子体对 T-2 毒素的降解效果较弱^[7,13]。电压升高,辉光增强,产生的 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}$ 、 $\cdot\text{H}$ 、 H_2O_2 等高活性粒子浓度增加,促使 T-2 毒素氧化降解效果增强^[14]。当活性物质浓度达到一定程度,T-2 毒素转化的反应也逐渐趋于饱和和达到平衡状态^[15],与试验结果一致。综上,GDP 降解 T-2 毒素的放电电压控制在 500~600 V 较为适宜。

2.1.2 作用时间 由图 3 可知,随着作用时间的延长,T-2 毒素的降解率逐步增大;当作用时间 >10 min 时,T-2 毒素降解率虽有增加,但增幅较小;与 1,5 min 相比,作用时间为 10,15,20 min 时,T-2 毒素降解率显著增加($P<0.05$),说明在 0~10 min 内,辉光放电等离子体中的活性物质主要与 T-2 毒素发生反应;而 10 min 后,T-2 毒素与活性粒子反应逐渐达到饱和,因此 T-2 毒素降解速率缓慢。此外,由于反应过程中产生的中间产物消耗了部分活性物质,致使与 T-2 毒素发生反应的 $\cdot\text{OH}$ 减少^[16],反应速率随着作用时间的延长而减小。因此,GDP 降解 T-2 毒素的作用时间保持在 10~20 min 比较适宜。

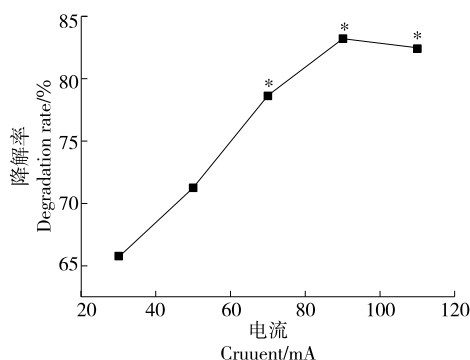
2.1.3 放电电流 由图 4 可知,随着放电电流的增加,T-2 毒素降解率呈先升高后下降趋势。当放电电流为 90 mA 时,T-2 毒素降解率达到最大,为 83.29%;与 30,50 mA 相比,放电电流为 70~110 mA 时,T-2 毒素降解率显著增加($P<0.05$)。提高放电电流,输入体系的功率增加,电极间的电场强度增强,形成了较大的微放电密度,电子在电场中获得更多的能量,加速了高能电子的形成。高能电子产生的速率和数量升高,轰击能力加强,从而使水分子和气体分子等更快更多地离解和电离,生成更多的活性物质^[17]。过高的放电电流,阳极铂丝易被熔化损坏,最终造成毒素降解率下降。因此,放电电流控制在 90~110 mA 最为适宜。



* 表示组内比较差异显著($P<0.05$)

图 3 作用时间对降解率的影响

Figure 3 Effects of action time on degradation rate

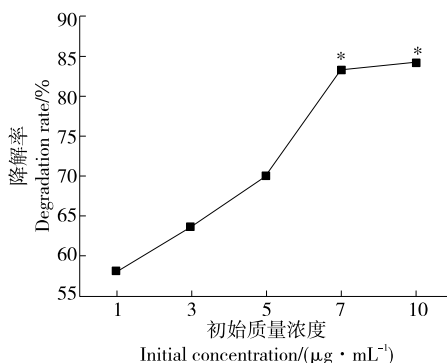


* 表示组内比较差异显著($P<0.05$)

图 4 放电电流对降解率的影响

Figure 4 Effects of discharge current on degradation rate

2.1.4 T-2 毒素初始质量浓度 由图 5 可知,当 T-2 毒素初始质量浓度 $\leq 7 \mu\text{g/mL}$ 时,随着初始质量浓度的增加,T-2 毒素降解率随之增加;当 T-2 毒素初始质量浓度 $>7 \mu\text{g/mL}$ 时,随着初始质量浓度的增加,T-2 毒素降解率增加幅度减缓;与其他质量浓度相比,初始质量浓度为 7,10 $\mu\text{g/mL}$ 时,T-2 毒素降解率增加显著($P<0.05$),说明在一定质量浓度范围内,溶液的初始质量浓度越大,毒素降解效果越好,与 Pu 等^[18]的结论一致。T-2 毒素的初始质量浓度越高,与 $\cdot\text{OH}$ 等发生有效碰撞的概率越大,毒素降解越快。初始质量浓度增大也会增加溶液的电导率,抑制放电过程中流光的形成,使产生的 $\cdot\text{OH}$ 量减少而抑制 T-2 毒素的降解^[19]。因此,T-2 毒素初始质量浓度控制在 5~10 $\mu\text{g/mL}$ 有利于反应的进行。



* 表示组内比较差异显著($P<0.05$)

图 5 T-2 毒素初始质量浓度对降解率的影响

Figure 5 Effects of initial concentration on degradation rate

2.2 响应面实验

2.2.1 响应面实验设计及结果 以放电电压、作用时间、放电电流、T-2 毒素初始质量浓度为自变量,T-2 毒素降解率为响应值,设计四因素三水平响应面实验,试验因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

2.2.2 模型拟合与分析 采用方差分析(ANOVA),二阶多项式模型来计算预测的响应,得到啤酒中 T-2 毒素降

解率对放电电压、作用时间、放电电流和 T-2 毒素初始质量浓度的回归模型方程:

$$Y = 82.68 + 4.38A + 9.26B + 5.89C + 8.84D - 1.62AB + 0.095AC + 2.63AD + 2.8BC - 6.46BD - 2.49CD - 5.54A^2 - 7.15B^2 - 4.97C^2 - 7.25D^2。$$
 (2)

由表 3 可知,模型 $P < 0.000 1$,极显著;失拟项 $P = 0.077 4 > 0.05$,不显著,说明试验设计可靠,适合二次回

表 1 响应面试验因素水平表

Table 1 Response interview test factors and levels

水平	A 放电电压/V	B 作用时间/min	C 放电电流/mA	D T-2 毒素初始质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)
-1	500	10	90	5.0
0	550	15	100	7.5
1	600	20	110	10.0

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface analysis scheme and results

试验号	A	B	C	D	T-2 毒素降解率/%
1	-1	-1	0	0	54.58
2	0	1	0	1	82.74
3	-1	0	1	0	73.87
4	0	-1	0	-1	40.33
5	0	0	0	0	83.20
6	0	1	1	0	88.59
7	1	0	0	1	83.26
8	0	0	0	0	80.51
9	1	0	1	0	81.17
10	0	-1	1	0	64.29
11	0	-1	0	1	73.87
12	0	0	1	1	83.59
13	-1	1	0	0	72.87
14	0	0	0	0	83.36
15	0	1	0	-1	75.08
16	-1	0	-1	0	62.86
17	0	0	1	-1	70.24
18	0	0	-1	1	75.59
19	-1	0	0	1	71.27
20	0	-1	-1	0	58.74
21	1	1	0	0	82.08
22	1	-1	0	0	70.27
23	0	0	0	0	83.17
24	0	0	0	0	83.17
25	-1	0	0	-1	62.38
26	1	0	-1	0	69.78
27	0	0	-1	-1	52.27
28	0	1	-1	0	71.86
29	1	0	0	-1	63.87

归方程。A、B、C、D、AD、BC、BD、CD、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 显著 ($P < 0.05$), AB、AC 不显著 ($P > 0.05$)。模型的 $R^2 = 0.979 6$,表明预测值与实际值具有有效的关联性; $R^2_{\text{adj}} = 0.959 2$,表明试验值可以由模型来预测。

2.2.3 响应面分析 由图 6 可知,随着作用时间与 T-2 毒素初始质量浓度的升高,T-2 毒素降解率先呈增加后减小的趋势,且曲面陡峭程度明显;同时,随着作用时间与放电电流的升高也出现了类似的趋势,表明放电电流与 T-2 毒素初始质量浓度、放电电流的交互作用显著 ($P < 0.05$)。

2.3 验证实验

经 Design-Expert.V 8.0.6 软件计算得到 GDP 对啤酒中 T-2 毒素的最佳降解参数为放电电压 572.934 V,作用时间 18.072 5 min,放电电流 99.236 1 mA,T-2 毒素初始质量浓度 8.334 4 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。根据实际情况,调整最佳降解条件为放电电压 570 V,作用时间 18 min,放电电流 99 mA,T-2 毒素初始质量浓度 8.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。在此条件下重复 5 次,T-2 毒素降解效率为 89.21%,与预测值 89.37%接近,因此该响应面优化模型得到的 GDP 对 T-2 毒素最佳降解条件准确且有效。

2.4 GDP 对啤酒品质的影响

啤酒的质量由其酒精度、原麦汁浓度、泡持性、双乙酰含量、苦味值等指标共同决定^[20],不同的工艺会对啤酒

表 3 方差分析

Table 3 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3 548.41	14	253.46	47.96	<0.000 1	**
A	230.56	1	230.56	43.63	<0.000 1	**
B	1 028.97	1	1 028.97	194.72	<0.000 1	**
C	415.72	1	415.72	78.67	<0.000 1	**
D	938.28	1	938.28	177.55	<0.000 1	**
AB	10.50	1	10.50	1.99	0.180 5	
AC	0.04	1	0.04	0.01	0.935 3	
AD	27.56	1	27.56	5.22	0.038 5	*
BC	31.36	1	31.36	5.93	0.028 8	*
BD	166.93	1	166.93	31.59	<0.000 1	**
CD	24.85	1	24.85	4.70	0.047 8	*
A^2	198.82	1	198.82	37.62	<0.000 1	**
B^2	331.97	1	331.97	62.82	<0.000 1	**
C^2	159.91	1	159.91	30.26	<0.000 1	**
D^2	341.20	1	341.20	64.57	<0.000 1	**
剩余	73.98	14	5.28			
失拟	68.06	10	6.81	4.60	0.077 4	
误差	5.92	4	1.48			
总和	3 622.40	28				

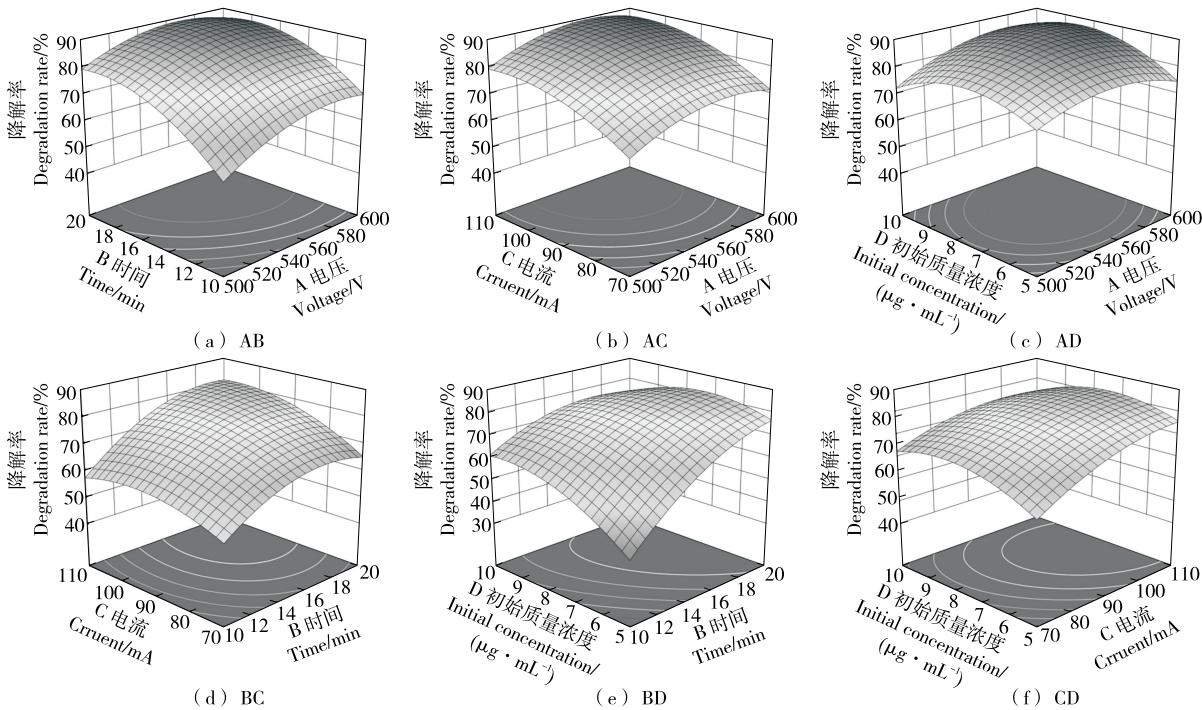


图 6 各因素交互作用的响应面图

Figure 6 Response surface of the interaction of various factors

的理化指标产生巨大影响^[21]。由表 4 可知,经 GDP 处理后,啤酒的酒精度、pH 值和泡持性均略微下降,色度值、浊度值、苦味值、双乙酰含量和总酸含量略微上升,原麦汁浓度不变;与对照组相比,泡持性下降显著($P<0.05$)。啤酒泡持性主要表现在啤酒的起泡性、持久性和附着性方面,是判别啤酒品质的重要因素,能够直观评价啤酒质量好坏,其主要受到 CO_2 、泡沫蛋白和异 α -酸等因素的影响^[22]。经 GDP 处理后,啤酒中部分 CO_2 发生逸散、泡沫蛋白发生分解,进而导致其泡持性下降。双乙酰是啤酒发酵过程中的重要代谢产物之一,是啤酒成熟与否的重要标志。啤酒中双乙酰含量必须 $<0.10 \text{ mg/L}$,若超过

0.2 mg/L ,就会产生饭馊味,严重影响啤酒品质^[23]。双乙酰是从 α -乙酸乳酸转化中获得的,GDP 处理可促使少量 α -乙酸乳酸转化,导致双乙酰含量上升。

啤酒中含有的酸类达 200 多种,这些酸及其盐类控制着啤酒的 pH 值和总酸含量,适合的酸味会赋予啤酒柔和的口感^[24]。啤酒中原有的一部分酸与啤酒中存在的金属离子相结合^[25],经 GDP 处理后有机酸解离出来,进而导致啤酒 pH 下降、总酸含量上升。原麦汁浓度主要反映发酵前麦芽汁中含有的可发酵糖含量,是鉴定啤酒品质的一个硬性指标。酒精度、苦味都是影响啤酒口味的重要口感指标,浊度可以直接影响其外观质量和非生物稳定性,啤酒的颜色更是评定啤酒质量的一项重要指标。啤酒经 GDP 处理后各指标均符合国标。综上,经 GDP 处理后啤酒中各项理化指标虽然会发生改变,但对啤酒品质影响较小。因此,将 GDP 降解装置应用于啤酒生产,能够有效降解原料中的 T-2 毒素,保障产品安全。

3 结论

辉光放电等离子体降解 T-2 毒素的最佳工艺条件为放电电压 570 V,作用时间 18 min,放电电流 99 mA,T-2 毒素初始质量浓度 $8.5 \mu\text{g/mL}$,此条件下 T-2 毒素降解率可达 89.21%。经辉光放电等离子体处理后,啤酒的泡持性显著降低($P<0.05$),其他指标无明显变化。后续可将辉光放电等离子体降解 T-2 毒素的工艺应用至果汁加工及其他真菌毒素的消解中。

表 4 GDP 处理对啤酒品质的影响[†]

Table 4 Effects of GDP treatment on beer quality			
指标	单位	GDP 处理	对照组
酒精度	%vol	3.58	3.63
色度	EBC	6.02	5.57
浊度	EBC	0.35	0.32
原麦汁浓度	°P	11.30	11.30
苦味值	BU	7.34	7.21
双乙酰	mg/mL	0.061	0.057
pH 值		4.53	4.59
总酸	mg/mL	1.51	1.48
泡持性	s	213 ^a	236

[†] a 表示与对照相比差异显著($P<0.05$)。

参考文献

- [1] PERNICA M, KYRALOVÁ B, SVOBODA Z, et al. Levels of T-2 toxin and its metabolites, and the occurrence of *Fusarium* fungi in spring barley in the Czech Republic[J]. Food Microbiology, 2022, 102: 103875.
- [2] 徐哲, 刘太国, 刘博, 等. 我国四大麦区小麦籽粒镰刀菌毒素检测与污染分析[J]. 植物保护, 2021, 47(3): 200-205, 236.
XU Z, LIU T G, LIU B, et al. Determination and contamination analysis of *Fusarium* mycotoxins in wheat grains from four different wheat regions[J]. Plant Protection, 2021, 47(3): 200-205, 236.
- [3] WU J, CHEN J X, HE J H. T-2 toxin-induced DRP-1-dependent mitophagy leads to the apoptosis of mice Leydig cells (TM3)[J]. Food Chemical Toxicology, 2020, 136: 111082.
- [4] LI J F, WANG Y T, DENG Y, et al. Toxic mechanisms of the trichothecenes T-2 toxin and deoxynivalenol on protein synthesis[J]. Food and Chemical Toxicology, 2022, 164: 113044.
- [5] 娄文芳, 吕承勇, 郭浩能, 等. 呕吐毒素和 T-2 毒素对热应激蛋鸡产蛋性能、肠道抗氧化及免疫功能的影响[J]. 中国家禽, 2023, 45(4): 44-49.
LOU W F, LU C Y, GUO H N, et al. Effects of deoxynivalenol and T-2 toxin on laying performance, antioxidant and immune function of heat-stressed laying hens[J]. China Poultry, 2023, 45(4): 44-49.
- [6] 刘培玲, 侯梦醒, 王超. 辉光放电等离子体与淀粉的相互作用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 344-357.
LIU P L, HOU M X, WANG C. Interaction between glow discharge plasma and starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(6): 344-357.
- [7] 杜明远, 龙海涛, 田立鹏, 等. 辉光放电等离子体对硫色镰刀菌的杀菌作用[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 89-96.
DU M Y, LONG H T, TIAN L P, et al. Fungicidal effect of glow discharge plasma on *Fusarium sulphureum*[J]. Food Science, 2020, 41(17): 89-96.
- [8] 李琬, 龙海涛, 许卫兵, 等. 接触辉光放电等离子体对枸杞种子萌发的促进作用及其处理工艺[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(1): 85-95.
LI W, LONG H T, XU W B, et al. Effects of contact glow discharge plasma on *Lycium barbarum* seed germination and seed treatment methodology[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(1): 85-95.
- [9] XU H B, ZHU Y P, DU M R, et al. Subcellular mechanism of microbial inactivation during water disinfection by cold atmospheric-pressure plasma[J]. Water Research, 2021, 188: 116513.
- [10] TAHOUN I, GABALLAH M, YAMANI R, et al. Development and validation of a reliable LC-MS/MS method for simultaneous determination of deoxynivalenol and T-2 toxin in maize and oats[J]. Microchem Journal, 2021, 169: 106599.
- [11] 李松迎, 徐康, 李宁阳, 等. 添加姜粉对浑浊小麦啤酒酿造品质与氧化稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 112-119.
- LI S Y, XU K, LI N Y, et al. Influences of ginger powder addition on brewing quality and oxidativestability of cloudy wheat beer[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(9): 112-119.
- [12] 张帆, 蒋卓, 张国文, 等. 超高压杀菌对比利时艾尔琥珀工坊啤酒贮藏品质变化的影响及货架期预测[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(16): 203-210.
ZHANG F, JIANG Z, ZHANG G W, et al. Effect of ultra high pressure sterilization on the storage quality and shelf life prediction of Belgian ale amber craft beer [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(16): 203-210.
- [13] ZHAO X T, SUN B, ZHU X M, et al. Characteristics of light emission and radicals formed by microwave discharge electrolysis of an aqueous solution[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 32(2): 359-368.
- [14] 郑继东, 陆泉芳, 俞洁, 等. 辉光放电电解等离子体降解水体中的罗丹明 B[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2 164-2 170.
ZHENG J D, LU Q F, YU J, et al. Degradation of Rhodamine B in aqueous solution by glow discharge electrolysis plasma[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(6): 2 164-2 170.
- [15] GUO X R, XU Y F, CHEN M, et al. Study on the performance of NTP with wood fiber in NO removal[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2022, 40: 921-936.
- [16] 孙艳, 蒲陆梅, 龙海涛, 等. 辉光放电等离子体对苹果汁中棒曲霉素降解作用及对苹果汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 104-108.
SUN Y, PU L M, LONG H T, et al. Effect of glow discharge plasma on the degradation of patulin in apple juice and its quality [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 104-108.
- [17] WANG H, QU G, LI R, et al. Elimination of *Microcystis aeruginosa* in water via barrier discharge plasma: Efficacy, mechanism, and toxin release[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 422: 126956.
- [18] PU L M, YANG B, LONG H T, et al. Glow discharge plasma efficiently degrades T-2 toxin in aqueous solution and patulin in apple juice[J]. Advanced Techniques in Biology & Medicine, 2017, 5: 1000221.
- [19] 纪剑, 于坚, 王良哲, 等. 真菌毒素的降解技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 1-10.
JI J, YU J, WANG L Z, et al. Research progress in mycotoxin degradation technology [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(5): 1-10.
- [20] 刘丽, 王增艳, 王佳阳, 等. 啤酒腐败有害片球菌生物被膜形成活的不可培养状态研究[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(2): 51-57.
LIU L, WANG Z Y, WANG J Y, et al. Formation of viable but non-culturable cells of harmful beer-spoilage *Pediococcus damnosus* in biofilms[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(2): 51-57.

(下转第 25 页)

- Preparation of new MOF-808/chitosan composite for Cr (VI) adsorption from aqueous solution: Experimental and DFT study[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 288: 119383.
- [27] CHO K H, CHITALE S K, KIM S J, et al. Adsorptive removal of nerve-agent simulant with zirconium-based metal-organic frameworks modified by hydrophobic monocarboxylic acids [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2019, 285: 61-69.
- [28] ZHAO Y, ZHAO H, ZHAO X, et al. Synergistic effect of electrostatic and coordination interactions for adsorption removal of cephalexin from water using a zirconium-based metal-organic framework[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 580: 256-263.
- [29] GULCAY-OZCAN E, IACOMI P, KO Y, et al. Breaking the upper bound of siloxane uptake: Metal-organic frameworks as an adsorbent platform[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9 (21): 12 711-12 720.
- [30] DU X D, YI X H, WANG P, et al. Robust photocatalytic reduction of Cr (VI) on UiO-66-NH₂ (Zr/Hf) metal-organic framework membrane under sunlight irradiation [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 356: 393-399.
- [31] ZHANG X, YANG Y, LU X, et al. Adsorption/desorption kinetics and breakthrough of gaseous toluene for modified microporous-mesoporous UiO-66 metal organic framework [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 366: 140-150.
- [32] LUO H B, REN Q, WANG P, et al. High proton conductivity achieved by encapsulation of imidazole molecules into proton-conducting MOF-808 [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(9): 9 164-9 171.
- [33] XU J, LIU J, LI Z, et al. Optimized synthesis of Zr (iv) metal organic frameworks (MOFs-808) for efficient hydrogen storage [J]. New Journal of Chemistry, 2019, 43(10): 4 092-4 099.
- [34] LIU H, XU C, LI D, et al. Photocatalytic hydrogen production coupled with selective benzylamine oxidation over MOF composites[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2018, 57 (19): 5 379-5 383.
- [35] KRUGER M, REINSCH H, INGE A K, et al. Effect of partial linker fluorination and linker extension on structure and properties of the Al-MOF CAU-10 [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2017, 249: 128-136.
- [36] ISRAELI-LEV G, PITCHKHADZE M, NEVO S, et al. Harnessing proteins to control crystal size and morphology, for improved delivery performance of hydrophobic bioactives, using genistein as a model[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 97-107.
- [37] TANHAEI M, MAHJOUR A R, SAFARIFARD V. Energy-efficient sonochemical approach for the preparation of nanohybrid composites from graphene oxide and metal-organic framework[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2019, 102: 185-191.
- [38] OTTER D, MONDAL S S, ALREFAI A, et al. Characterization of an isostructural MOF series of imidazolate frameworks potsdam by means of sorption experiments with water vapor[J]. Nanomaterials (Basel), 2021, 11(6): 1 400.
- [39] JIN L, QIN Q, DONG L, et al. Study of the cycloaddition of CO₂ with styrene oxide over six-connected spn topology MOFs (Zr, Hf) at room temperature[J]. Chemistry, 2021, 27(60): 14 947-14 963.
- [40] 周帆. 多级孔 UiO-66 和 UiO-66-NH₂ 的合成、表征及性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018: 27.
- ZHOU F. Synthesis, characterization and properties of hierarchical UiO-66 and UiO-66-NH₂ [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018: 27.
- [41] LIN Z J, ZHENG H Q, ZENG Y N, et al. Effective and selective adsorption of organoarsenic acids from water over a Zr-based metal-organic framework[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 378: 122196.
- [42] DERIA P, MONDLOCH J E, TYLIANAKIS E, et al. Perfluoroalkane functionalization of NU-1000 via solvent-assisted ligand incorporation: synthesis and CO₂ adsorption studies [J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135(45): 16 801-16 804.
- [43] 骆永伟. Zr 基吸气剂的制备与吸附性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022: 27.
- LUO Y W. Study on the preparation and adsorption properties[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022: 27.

(上接第 17 页)

- [21] 宣文芳. 水蜜桃精酿啤酒酿造工艺优化及其品质分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2022: 34.
- XUAN W F. Study on brewing process optimization and flavor quality analysis of peach craft beer [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022: 34.
- [22] LU Y, CHOI B, NYLANDER T, et al. Surface rheology and morphology of beer protein and iso humulone at air-liquid surface [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 105897.
- [23] 于洪梅, 赵寿经, 王妮. 低双乙酰啤酒酵母菌种的诱变及对啤酒酿造的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(5): 1 919-1 925.
- YU H M, ZHAO S J, WANG N. Screening of brewer's yeast with low yield of higher alcohols and the effect on beer brewing technology [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 1 919-1 925.
- [24] 龚霄, 陈廷慧, 胡小军, 等. 基于 GC-IMS 技术的百香果啤风味分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 46-52, 75.
- GONG X, CHEN T H, HU X J, et al. Flavor analysis of passion beer based on GC-IMS technology[J]. Food & Machinery, 2022, 38 (11): 46-52, 75.
- [25] 邓倩. 小麦啤酒中主要有机酸构成及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020: 31-50.
- DENG Q. Research on the compositions and influencing factors of main organic acids in wheat beer[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020: 31-50.