

# 红茶茶渣制备还原糖预处理工艺优化

蒙翠怡,朱泳光,程缘,高晓惠,程谦伟,陈通,孟陆丽\*

(广西科技大学 生物与化学工程学院,广西 柳州 545006)

**摘要:** 该研究以红茶茶渣为原料,利用超声波联合碱性双氧水对红茶茶渣进行预处理,探究超声时间、双氧水体积分数、超声温度、NaOH质量浓度对酶解茶渣制备还原糖的影响。研究表明,在超声时间30 min、超声温度80℃、NaOH质量浓度0.5%、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数0.2%的条件下对红茶茶渣进行预处理而后进行酶解,此条件下还原糖的产率为19.63%。因此利用超声波联合碱性双氧水对红茶茶渣进行预处理可以有效提高酶解红茶茶渣制备还原糖的产率。

**关键词:** 红茶;茶渣;还原糖;超声波;预处理

## Optimization of Pretreatment Technology for Preparing Reducing Sugar from Black Tea Residue

MENG Cuiyi, ZHU Yongguang, CHENG Yuan, GAO Xiaohui, CHENG Qianwei, CHEN Tong, MENG Luli\*

(College of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China)

**Abstract:** In this study, black tea residue was used as the raw material and was pretreated using ultrasound waves combined with alkaline hydrogen peroxide. The effects of ultrasound time, volume fraction of hydrogen peroxide, ultrasound temperature, and NaOH mass concentration on the enzymatic hydrolysis of the tea residue to prepare reducing sugar were investigated. The results showed that under the conditions of ultrasound time of 30 min, ultrasound temperature of 80℃, NaOH mass concentration of 0.5%, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> volume fraction of 0.2%, the black tea residue was pretreated and then enzymatically hydrolyzed, resulting in a reducing sugar yield of 19.63%. The application of ultrasound waves combined with alkaline hydrogen peroxide to pretreat black tea residue could effectively improve the yield of reducing sugar prepared by enzymatic hydrolysis of black tea residue.

**Key words:** black tea; tea residue; reducing sugar; ultrasound wave; pretreatment

引文格式:

蒙翠怡,朱泳光,程缘,等. 红茶茶渣制备还原糖预处理工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4): 68-73.

MENG Cuiyi, ZHU Yongguang, CHENG Yuan, et al. Optimization of Pretreatment Technology for Preparing Reducing Sugar from Black Tea Residue[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4): 68-73.

我国是茶叶大国,茶叶生产和消费呈现逐年增长的趋势,茶叶的消费增长每年会产生大量的茶叶残渣。这些茶渣除了少部分用于肥料、饲料,大多数被直接废弃或者焚烧,得不到充分有效地利用,一方面容易污染环境,另一方面造成了生物资源的浪费<sup>[1-2]</sup>。研究表明,茶渣中含有丰富的木质纤维素,具有一定的开发利用价值,若能加以利用,则有利于减少茶渣的浪费,扩大可再生资源的利用,从而有效地提高其附加值<sup>[3-4]</sup>。木质纤维素是重要的可再生能源,可以通过酶水解成还原糖然后再进一步加以利用。随着环保意识不断增

强,利用木质纤维素生物质生产的生物燃料成为化石燃料的理想替代品,有利于将化石燃料的依赖转向可持续能源,减轻对自然资源的压力<sup>[5-7]</sup>。利用木质纤维素生物质生产生物燃料通常要先经过预处理后进行酶解,而后再通过发酵得到生物燃料。虽然木质纤维素生物质是一种廉价的可再生资源,但是由于木质纤维素复杂的结构和高度的聚合性,限制了酶与其的接触,导致生物质利用率低,往往需要经过一定的预处理才能得到有效利用。预处理对于利用木质纤维素生物质后续的酶解反应效果是非常重要的,预处理可以破坏

基金项目:国家自然科学基金项目(32360634);广西壮族自治区大学生创新创业训练计划项目(202110594093)

作者简介:蒙翠怡(2002—),女(汉),本科在读,研究方向:食品科学与工程。

\*通信作者:孟陆丽(1980—),女(汉),副教授,硕士,研究方向:食品加工与质量测控。

木质纤维素结构,去除部分木质素,使其更容易被酶水解从而有效地提高还原糖的产率,进而适用于生产生物燃料,提高利用率<sup>[8]</sup>。

利用 NaOH、Ca(OH)<sub>2</sub> 等碱对木质纤维素生物质进行预处理是有效的预处理手段之一,利用碱进行预处理可以在一定程度上促使纤维素溶胀,增加纤维素的比表面积,降低其结晶度,同时碱性预处理通过破坏酯键,促进木质素的脱除,提高木质纤维素的孔隙率,从而提高酶解的效率<sup>[9-11]</sup>。过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)作为对环境有利的氧化剂之一,已经在工业生产中得到了广泛应用。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>在一定的条件下可以产生羟自由基,羟自由基是一种强大的氧化剂,在氧化脱木质素方面起着至关重要的作用,与木质素反应从而分解共聚复合物并促进其溶解<sup>[12-13]</sup>,进而提高酶解的效率。研究发现,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>与 NaOH 联用对原料进行预处理可以在相对比较温和的条件进行,同时能明显地提高纤维素的含量,降低木质素和半纤维素的含量,有利于酶解反应的进行,提高酶解反应的效果<sup>[14]</sup>。超声波具有能耗低、渗透能力强、绿色安全等优点,作为一种强化反应手段已经得到广泛应用。超声波可以产生较强的剪切力,降低溶液张力和黏度,利用超声波处理能加快非均相体系的混合,增加两相接触,且超声波作用还会引发空化效应,产生高温、高压,对化学反应具有一定的强化作用<sup>[15]</sup>。另外,超声波处理的过程中还会产生羟自由基,进而加快反应的进行<sup>[16]</sup>。因此超声波作为一种物理手段常常会与其他处理方法联用以进一步提高反应效果。有研究表明,通过超声波辅助碱性预处理可以产生协同作用,进一步增强碱性预处理的效果,能够更有效地促进木质素的去除,提高后续酶解过程的还原糖产率<sup>[17-18]</sup>。

为有效地提高红茶茶渣的利用率,本研究将物理手段与化学预处理方法相结合,采用超声波联合碱性双氧水对红茶茶渣进行预处理,考察超声时间、双氧水体积分数、超声温度、NaOH 质量浓度对酶解茶渣制备还原糖产率的影响,以期开发出一种有效的茶渣预处理方法,为进一步开发利用红茶茶渣中的多糖类物质提供参考。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 主要原料与试剂

广西柳州三江红茶茶叶:市售;纤维素酶(100 000 U/g):山东隆科特酶制剂有限公司;葡萄糖:天津市致远化学试剂有限公司;3,5-二硝基水杨酸:天津市大茂化学试剂厂;氢氧化钠、过氧化氢:四川西陇科学有限公司。所用化学试剂均为分析纯。

### 1.2 试验仪器

超声波清洗机(KQ-500DE):昆山市超声波仪器有限公司;恒温培养摇床(THZ-100):上海一恒科学仪器

有限公司;电子天平(AL204):梅特勒-托利多仪器有限公司;紫外分光光度计(TU-1950):北京普析通用仪器有限公司;扫描电镜(Apreo 2C):美国赛默飞世尔科技公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 茶渣的预处理

将泡茶后的茶渣 70 ℃烘干粉碎后过 40 目筛,称取 5 g 茶渣加入到 NaOH 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的混合溶液,按料液比 1:10 (g/mL)混匀,在一定的温度下超声波(超声功率 250 W)处理一定时间后 3 500 r/min 离心 10 min,除去上清液,将固体水洗至中性后烘干至恒重,即得到预处理后的茶渣。

#### 1.3.2 纤维素酶酶解茶渣

称取 0.20 g 纤维素酶于锥形瓶中,加入 30 mL pH4.8 的醋酸-醋酸钠缓冲溶液,添加 1.5 g 经预处理后的茶渣,而后密封置于 120 r/min、50 ℃的摇床中进行酶解,酶解时间设置为 48 h。

#### 1.3.3 还原糖含量的测定

采用 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)比色法测定酶解液还原糖的含量<sup>[19]</sup>。

##### 1.3.3.1 葡萄糖标准曲线的绘制

准确称取 1.000 g 葡萄糖配制成 1 mg/mL 的葡萄糖标准溶液。分别吸取 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL 葡萄糖标准溶液置于试管中,再补充一定量的蒸馏水使试管中的溶液达到 1.0 mL,随后加入 DNS 溶液(1.5 mL),沸水浴加热 5 min,加入 4 mL 蒸馏水,冷却 20 min 后于 540 nm 处测定吸光度,绘制标准曲线,得到回归方程。

##### 1.3.3.2 酶解液还原糖含量的测定及产率的计算

将酶解后的混合液在 3 500 r/min 的条件下离心 10 min,取上清液稀释相应的倍数,随后加入 1.5 mL DNS 溶液,按照 1.3.3.1 的步骤进行操作测定样品的吸光度,代入标准曲线方程确定还原糖含量。

还原糖产率的计算公式如下。

$$X = \frac{M}{W} \times 100$$

式中:X 为还原糖产率,%;M 为茶渣酶解液中还原糖的含量,g;W 为茶渣的质量,g。

### 1.3.4 单因素试验

#### 1.3.4.1 超声时间对酶解茶渣制备还原糖产率的影响

在超声温度 70 ℃、NaOH 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 混合溶液中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 体积分数为 0.8%、NaOH 质量浓度为 1.5% 的条件下,选取超声时间 10、20、30、40、50 min 对茶渣进行预处理,而后酶解预处理后的茶渣,考察超声时间对酶解茶渣制备还原糖产率的影响。

#### 1.3.4.2 NaOH 质量浓度对酶解茶渣制备还原糖产率的影响

在超声温度 70 ℃、超声时间 30 min、NaOH 与

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>混合溶液中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数为0.8%的条件下,选取NaOH与H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>混合溶液中NaOH质量浓度为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%,考察NaOH质量浓度对酶解茶渣制备还原糖产率的影响。

1.3.4.3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数对酶解茶渣制备还原糖产率的影响

在超声温度70℃、超声时间30min、NaOH与H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>混合溶液中NaOH溶液质量浓度为1.0%的条件下,选取NaOH与H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>混合溶液中H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数为0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%、1.2%,考察H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数对酶解茶渣制备还原糖产率的影响。

1.3.4.4 超声温度对酶解茶渣制备还原糖产率的影响

在超声时间30min、NaOH与H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>混合溶液中NaOH溶液质量浓度为1.0%、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数为0.4%的条件下,选取超声温度为40、50、60、70、80℃,考察超声温度对酶解茶渣制备还原糖产率的影响。

1.3.5 正交试验

根据单因素的试验结果,选取NaOH质量浓度、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数和超声温度作为因素,以还原糖产率为指标作正交试验,因素与水平见表1。

表1 正交因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	A 超声温度/℃	B NaOH 质量浓度/%	C H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 体积分数/%
1	60	0.5	0.2
2	70	1.0	0.4
3	80	1.5	0.6

1.3.6 茶渣的微观结构分析

取少量烘干后过100目筛的粉末样品置于导电胶上,表面喷金处理后,在5kV扫描电压下用扫描电镜进行观察。

1.4 数据处理

采用Excel 2016和Origin 9.0软件进行数据处理及作图,数据结果以平均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

2.1 葡萄糖标准曲线的绘制

以吸光度为纵坐标,葡萄糖含量为横坐标作葡萄糖标准曲线,结果见图1。

由图1可知,在一定的测定范围内,吸光度和葡萄糖含量之间存在较好的线性关系,得到的标准曲线的回归方程为 $y=1.51x-0.1058$ , $R^2=0.9988$ 。

2.2 超声时间对酶解茶渣还原糖产率的影响

超声时间对酶解茶渣还原糖产率的影响见图2。

由图2可知,超声时间为10~30min时,随着超声时间的延长,还原糖产率增加较快,超声时间达到30min之后,随超声时间的进一步延长,还原糖产率变

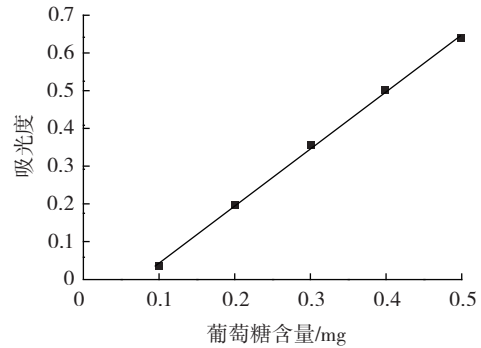


图1 葡萄糖标准曲线

Fig.1 Standard curve of glucose

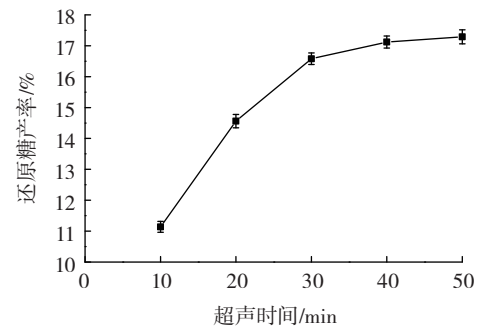


图2 超声时间对酶解茶渣还原糖产率的影响

Fig.2 Effect of ultrasound time on yield of reducing sugar by enzymatic hydrolysis of tea residue

化不大,趋于平缓。这可能是由于超声波处理的过程中会产生机械力和自由基,破坏纤维素、半纤维素和木质素之间的化学键,使得其结构受到破坏,同时超声产生的空化效应随着时间的延长而增加,这些有利于改善反应的传质效应,扩大与木质纤维素生物质的接触面积,提高反应速率,对酶解反应的进行有一定的促进作用,从而提高了酶解茶渣的还原糖产率<sup>[20-21]</sup>。因为超声30min后还原糖产率变化趋于平缓,所以选取超声时间为30min进行后续试验。

2.3 NaOH质量浓度对酶解茶渣还原糖产率的影响

NaOH质量浓度对酶解茶渣还原糖产率的影响见图3。

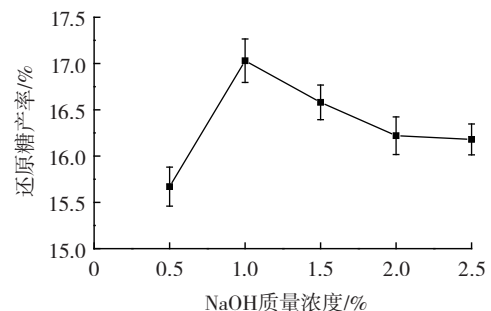


图3 NaOH质量浓度对酶解茶渣还原糖产率的影响

Fig.3 Effect of NaOH mass concentration on yield of reducing sugar by enzymatic hydrolysis of tea residue

由图3可知,随着NaOH质量浓度的增加,酶解茶渣还原糖产率先上升后下降,还原糖产率在NaOH质量浓度为1.0%时最高,再增加NaOH质量浓度时,还原糖产率有下降趋势。这是由于在一定的NaOH质量浓度范围内,随着NaOH质量浓度的提高,可以促进木质素的溶解,有利于木质素的去除,在预处理过程中有效地去除木质素对于后续酶解反应的进行有促进作用,促使更多的纤维素暴露出来,有利于酶水解反应的进行,使茶渣酶解效率提高,进而促使还原糖产率提高,但NaOH质量浓度过高,纤维素可能会发生降解,从而导致酶解茶渣还原糖产率降低<sup>[22]</sup>。因此,选择NaOH质量浓度0.5%、1.0%、1.5%进行后续正交试验。

#### 2.4 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数对酶解茶渣还原糖产率的影响

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数对酶解茶渣还原糖产率的影响见图4。

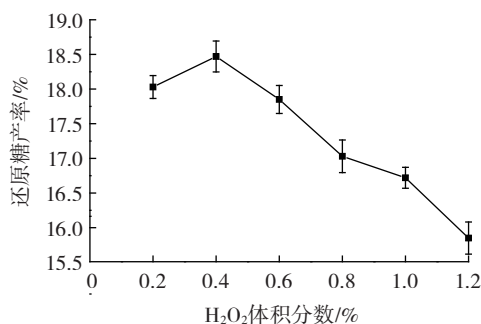


图4 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数对酶解茶渣还原糖产率的影响

Fig.4 Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> volume fraction on yield of reducing sugar by enzymatic hydrolysis of tea residue

由图4可知,随着H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数的增加,酶解茶渣还原糖产率先有所增加而后降低,在H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数为0.4%时,还原糖产率达到最大值。初期H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>在碱性条件下能解离生成高活性羟自由基和超氧阴离子自由基,破坏木质素结构,从而促进木质素的脱除,增加了孔隙率和表面积,使酶解茶渣的还原糖产率有所提高<sup>[23]</sup>。但随着H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数的进一步增大,酶解茶渣还原糖的产率有所下降,这可能是由于过量的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>会促使纤维素的破坏加剧,从而降低了纤维素酶水解效率<sup>[24]</sup>。因此,选择H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数0.2%、0.4%、0.6%进行后续正交试验。

#### 2.5 超声温度对酶解茶渣还原糖产率的影响

超声温度对酶解茶渣还原糖产率的影响见图5。

由图5可知,超声温度为40~70℃时,还原糖产率随着超声温度的升高而升高,当温度超过70℃时,酶解茶渣还原糖产率变化不明显。这可能是由于适当地升高超声温度能够形成更多的自由基,有利于破坏木质纤维素组分之间的化学键,破坏木质纤维素的致密结构,从而加快木质素与半纤维素的分离,促使反应速率加快,提高酶解茶渣还原糖的产率<sup>[25-26]</sup>。因此,选择

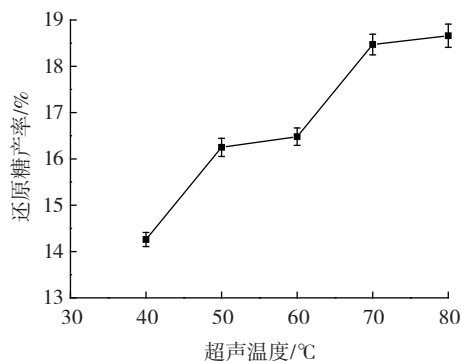


图5 超声温度对酶解茶渣还原糖产率的影响

Fig.5 Effect of ultrasound temperature on yield of reducing sugar by enzymatic hydrolysis of tea residue

超声温度60、70、80℃进行后续正交试验。

#### 2.6 正交试验结果

根据单因素试验结果,选取超声时间30 min,利用L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交试验设计表进行正交试验,结果见表2。

表2 正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results

试验号	A 超声温度	B NaOH质量浓度	C H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 体积分数	D 空列	还原糖产率 / %
1	1	1	1	1	16.67
2	1	2	2	2	16.48
3	1	3	3	3	14.33
4	2	1	2	3	17.93
5	2	2	3	1	17.85
6	2	3	1	2	17.54
7	3	1	3	2	19.03
8	3	2	1	3	18.22
9	3	3	2	1	17.47
K <sub>1</sub>	47.48	53.63	52.43	51.99	
K <sub>2</sub>	53.32	52.55	51.88	53.05	
K <sub>3</sub>	54.72	49.34	51.21	50.48	
R	7.24	4.29	1.22	2.57	

由表2可知,正交试验所取得的最优方案为A<sub>3</sub>B<sub>1</sub>C<sub>1</sub>,即超声温度80℃、NaOH质量浓度0.5%、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数0.2%,超声波联合碱性双氧水预处理茶渣对酶解红茶茶渣还原糖产率的因素影响大小依次为A(超声温度)>B(NaOH质量浓度)>C(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数)。

正交试验结果的方差分析见表3。

表3 正交试验结果的方差分析

Table 3 Analysis of variance of orthogonal test results

方差来源	平方和	自由度	均方	F值
A	9.831	2	4.916	14.459
B	3.319	2	1.660	4.882
C	0.249	2	0.1245	
误差e	1.112	4	0.278	
总和	14.511	8		

注:e<sup>Δ</sup>为C和e合并,构成新的误差项;F<sub>0.05</sub>(2,4)=6.94,F<sub>0.01</sub>(2,4)=18<sup>[27]</sup>。

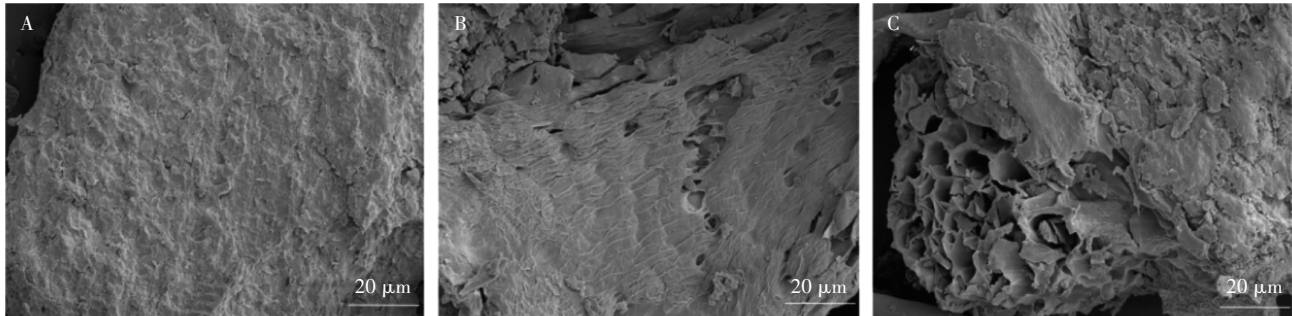
由表3可以看出,超声温度对还原糖产率的影响显著,而NaOH质量浓度和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数在本研究条件下对酶解红茶茶渣的还原糖产率的影响差异不显著。在正交试验所得到的最优条件为超声温度80℃、NaOH质量浓度0.5%、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数0.2%。在此条件下对红茶茶渣进行预处理而后进行酶解,所得到的还

原糖产率为19.63%,而未利用超声波强化预处理过程而后酶解红茶茶渣所得到的还原糖产率为13.92%。

### 2.7 茶渣的微观结构分析

通过扫描电镜观察预处理后的茶渣和未处理茶渣的微观结构,结果如图6所示。

由图6可以看出,未经预处理的茶渣表面较为致



A. 未经预处理茶渣;B. 碱性双氧水预处理茶渣;C. 超声波联合碱性双氧水预处理茶渣。

图6 未经预处理和预处理茶渣的扫描电镜图

Fig.6 Scanning electron microscopy images of untreated residue and pretreated tea residue

密、平整,没有明显的孔洞,而与未经预处理的茶渣相比,经过预处理后茶渣结构表面变得不平整,出现不规则的孔洞。超声波联合碱性双氧水预处理过程对茶渣的破坏更为明显,这是因为超声波辅助处理可以更大程度地破坏茶渣结构,使茶渣的孔隙率提高,增大茶渣的比表面积,进而增强预处理效果,使预处理后的茶渣能够更加容易地与纤维素酶接触,促进酶解反应的进行,进而提高酶解茶渣所得到的还原糖产率。

### 3 结论

本试验将物理手段与化学预处理方法相结合,利用超声波联合碱性双氧水对红茶茶渣进行预处理,研究预处理对酶解红茶茶渣制备还原糖产率的影响,研究表明,超声时间30 min、超声温度80℃、NaOH质量浓度0.5%、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体积分数0.2%的条件下对红茶茶渣进行预处理而后进行酶解,还原糖的产率为19.63%,而未利用超声波强化预处理过程而后酶解红茶茶渣所得到的还原糖产率为13.92%。由此可见,利用超声波联合碱性双氧水对红茶茶渣进行预处理增强了预处理效果,可以有效地提高酶解红茶茶渣制备还原糖的产率。

### 参考文献:

- [1] DING X Q, LI H Y, WEN Z W, et al. Effects of fermented tea residue on fattening performance, meat quality, digestive performance, serum antioxidant capacity, and intestinal morphology in fatteners [J]. *Animals*, 2020, 10(2): 185.
- [2] 梁杰,汪秀妹,杨艺伟,等.茶渣蛋白的提取及酶解产物抗氧化性质研究[J].*食品科技*, 2020, 45(9): 214-220.  
LIANG Jie, WANG Xiumei, YANG Yiwei, et al. Extraction of tea residue protein and antioxidant activity of enzymatic hydrolysates [J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(9): 214-220.

- [3] 孟洋,陈莉,卢红梅.茶叶副产物中的有效成分、功效及综合利用研究进展[J].*食品研究与开发*, 2020, 41(5): 207-212.  
MENG Yang, CHEN Li, LU Hongmei. Research progress on active components, efficacy and comprehensive utilization of tea by-products [J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(5): 207-212.
- [4] 丁其欢,武珊珊,钱杨杨,等.中国茶渣综合利用研究现状[J].*热带农业科学*, 2021, 41(8): 66-70.  
DING Qihuan, WU Shanshan, QIAN Yangyang, et al. Comprehensive utilization of tea residues in China [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, 41(8): 66-70.
- [5] CORNEJO A, ALEGRIA-DALLO I, GARCÍA-YOLDI Í, et al. Pretreatment and enzymatic hydrolysis for the efficient production of glucose and furfural from wheat straw, pine and poplar chips [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121583.
- [6] 曹运齐,刘云云,胡南江,等.燃料乙醇的发展现状分析及前景展望[J].*生物技术通报*, 2019, 35(4): 163-169.  
CAO Yunqi, LIU Yunyun, HU Nanjiang, et al. Current status and prospects of fuel ethanol production [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(4): 163-169.
- [7] HO M C, ONG V Z, WU T Y. Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization-A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 112: 75-86.
- [8] MOSIER N, WYMAN C, DALE B, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(6): 673-686.
- [9] BEHERA S, ARORA R, NANDHAGOPAL N, et al. Importance of chemical pretreatment for bioconversion of lignocellulosic biomass [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36: 91-106.
- [10] MALIK K, SHARMA P, YANG Y L, et al. Lignocellulosic biomass for bioethanol: Insight into the advanced pretreatment and fermentation approaches [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 188: 115569.
- [11] LU H Y, LIU S Y, SHI Y, et al. Efficient delignification of sugarcane bagasse by Fenton oxidation coupled with ultrasound-assisted NaOH for biotransformation from *Agaricus sinodeliciosus* var. *chaidam* [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 448: 137719.

- [12] SHEIKH M M I, KIM C H, PARK H H, et al. A synergistic effect of pretreatment on cell wall structural changes in barley straw (*Hordeum vulgare* L.) for efficient bioethanol production[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(4): 843-850.
- [13] DÍAZ A B, BLANDINO A, BELLELI C, et al. An effective process for pretreating rice husk to enhance enzyme hydrolysis[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(27): 10870-10875.
- [14] CABRERA E, MUÑOZ M J, MARTÍN R, et al. Alkaline and alkaline peroxide pretreatments at mild temperature to enhance enzymatic hydrolysis of rice hulls and straw[J]. Bioresource Technology, 2014, 167: 1-7.
- [15] TAN S X, LIM S, ONG H C, et al. State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production[J]. Fuel, 2019, 235: 886-907.
- [16] BUSSEMAKER M J, ZHANG D K. Effect of ultrasound on lignocellulosic biomass as a pretreatment for biorefinery and biofuel applications[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2013, 52(10): 3563-3580.
- [17] SUBHEDAR P B, GOGATE P R. Alkaline and ultrasound assisted alkaline pretreatment for intensification of delignification process from sustainable raw-material[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(1): 216-225.
- [18] UTEKAR P G, KININGE M M, GOGATE P. Intensification of delignification and enzymatic hydrolysis of orange peel waste using ultrasound for enhanced fermentable sugar production[J]. Chemical Engineering and Processing, 2021, 168: 108556.
- [19] 赵凯, 许鹏举, 谷广焯. 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 534-536.  
ZHAO Kai, XU Pengju, GU Guangye. Study on determination of reducing sugar content using 3, 5-dinitrosalicylic acid method[J]. Food Science, 2008, 29(8): 534-536.
- [20] 雷声波, 黄斌良, 黄燕菲, 等. 超声波结合碱性  $H_2O_2$  法提取甘蔗渣综纤维素[J]. 南方农业学报, 2018, 49(2): 354-359.  
LEI Shengbo, HUANG Binliang, HUANG Yanfei, et al. Extraction of holocellulose from sugarcane bagasse using alkaline- $H_2O_2$  combined with ultrasonic[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(2): 354-359.
- [21] 翟光雯, 汤斌, 张庆庆, 等. 超声波法预处理对秸秆纤维素水解的促进作用[J]. 安徽工程科技学院学报(自然科学版), 2007, 22(4): 22-24.  
ZHAI Guangwen, TANG Bin, ZHANG Qingqing, et al. Promotional effect of ultrasonication pretreatment on hydrolysis of cellulose to corn stover[J]. Journal of Anhui University of Technology and Science (Natural Science), 2007, 22(4): 22-24.
- [22] COIMBRA M C, DUQUE A, SAÉZ F, et al. Sugar production from wheat straw biomass by alkaline extrusion and enzymatic hydrolysis[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 1060-1068.
- [23] ZHANG H D, HUANG S H, WEI W Q, et al. Investigation of alkaline hydrogen peroxide pretreatment and Tween 80 to enhance enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse[J]. Biotechnology for Biofuels, 2019, 12: 107.
- [24] LI Y P, CUI J F, ZHANG G L, et al. Optimization study on the hydrogen peroxide pretreatment and production of bioethanol from seaweed *Ulva prolifera* biomass[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 144-149.
- [25] 辛民岳, 梁列峰. 超声波辅助碱-酸法提取蔗渣纤维素的研究[J]. 国际纺织导报, 2020, 48(2): 4-6, 8-11, 26.  
XIN Minyue, LIANG Liefeng. Study on extraction of cellulose from bagasse by ultrasonic assisted alkaline and acid treatment[J]. Melliland China, 2020, 48(2): 4-6, 8-11, 26.
- [26] MEROUANI S, HAMD AOUI O, SA OUDI F, et al. Influence of experimental parameters on sonochemistry dosimetries: KI oxidation, Fricke reaction and  $H_2O_2$  production[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/3): 1007-1014.
- [27] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2017.  
LI Yunyan, HU Chuanrong. Experiment design and data processing [M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.

加工编辑: 刘艳美  
收稿日期: 2023-11-02