

干燥介质相对湿度对红枣热风干燥特性的影响

刘品,刘寅*,张艳,酒曼

(中原工学院 能源与环境学院,河南 郑州,450000)

摘要 以新郑大枣为实验材料,利用单因素实验法,在控湿阶段相同温升范围(35~65℃),相同风速(1 m/s)条件下,研究了控湿阶段不同相对湿度(持续排湿、40%、50%、60%)对红枣内部升温、干燥时间、能耗、感官品质的影响。结果表明,在控湿阶段增加热风相对湿度可以提高红枣内部升温速度,避免表皮硬化,增加红枣内部水分向外迁移的速度,从而提高整体干燥速率,缩短干燥时间,降低干燥过程中的能耗。当控湿阶段相对湿度为60%时,干燥时间比整个阶段持续排湿干燥减少了15.30%,能耗降低了34.78%。红枣干制品收缩均匀,颜色鲜亮。目前的研究结果有助于了解热风相对湿度对大枣干燥特性的影响,为提高干燥率和干燥品质以及降低干燥能耗提供了理论依据。

关键词 大枣;热风干燥;干燥速度;湿度控制

我国是红枣的生产大国,种植面积高达133.3万 hm^2 ,年产量达25亿kg,占世界总产量的90%以上^[1-2]。大枣以其高营养和功能价值而闻名,包括糖类、矿物质、蛋白质、维生素C^[3]。但是,红枣采摘后保质期非常短,在非控制条件下储存时间不能超过10 d^[4]。干燥可以用来去除食物中的水分,因此它可以抑制微生物的生长,延长食物的保存时间。热风干燥,因其结构简单、成本低,是目前最流行的干燥方法之一^[5-6]。

红枣热风干燥是一个复杂的过程,同时涉及传热和传质。目前一些学者主要研究干燥温度、风速、恒定相对湿度和装载量等对红枣热风干燥特性的影响^[7-9]。而分阶段降湿干燥对红枣干燥特性的影响研究较少。变温干燥作为一种干燥方式,可以有效地减少物料干燥时间和干燥过程中的能量消耗,并保持产品干燥品质。王庆惠等^[10]在圣女果热风干燥特性研究中发现,采用分段式变温变湿干燥工艺,即干燥前期采用低温高湿,缓慢增温并降低湿度,能有效减少圣女果营养成分的损失和色泽变化,并缩短干燥时间。DAI等^[11]在研究基于干燥温度和湿度综合控制对杏干燥特性的影响中发现,与相同温度下连续除湿相比,控制湿度可以提高杏的干燥速率,干燥时间与连续排湿相比缩短了18.75%。KOWALSKI等^[12]在研究间歇干燥对能耗和物料干燥品质的影响中发现,

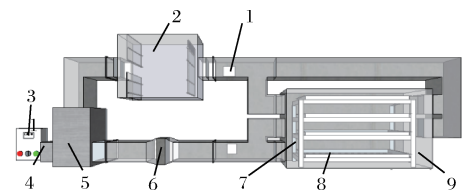
间歇干燥能提高物料的干燥品质。据悉,关于红枣的变温变湿干燥的研究主要针对温度的变化,而对于相对湿度的变化研究几乎空白。因此,本文研究了控湿阶段不同相对湿度(持续排湿、40%、50%、60%)对干燥速率、能耗、干燥品质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新郑新鲜红枣(湿基含水率为 $(80 \pm 1)\%$ ^[13]),郑州市新郑市阿里菜市场。

热风干燥试验台由加热室、干燥室、加湿室、物料架、物料盘(规格:650 mm×350 mm)、循环风机(SF-15051, SMS)、温湿度控制装置(HS-668,民熔)、风速控制装置(KTS-A8,惠丰)等组成。温度控制范围为0~100℃,热风速度控制范围为0~3 m/s。试验台的结构如图1所示。



1-排湿口;2-加湿室;3-控制箱;4-新风口;5-加热室;6-循环风机;
7-物料架;8-物料盘;9-加热室

图1 热风干燥试验台结构图

Fig.1 Structure diagram of hot air drying test bench

其他设备:UTP-313型电子秤,上海花潮电器有限公司;TESTO 425型高精度风速仪,德图仪器国

第一作者:硕士(刘寅教授为通讯作者,E-mail:15937105885@126.com)。

收稿日期:2018-10-30,改回日期:2019-01-08

际贸易有限公司;Ms-7310 型温湿度传感,上海搜博实业有限公司;T 型热电偶,上海南浦仪表厂;34972A 型数据采集仪器,美国安捷伦科技有限公司;DDS161 型电子式单相电能表,上海人民高低压成套设备有限公司;HH171010 型雾化器,浙江和享科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 试验前准备

将无破损、虫蛀、霉烂,个头饱满的红枣用水洗净后晾干并分成几乎相同质量的 4 份进行试验。每份分成 3 等份,均匀地铺放在 3 个物料盘中。开启循环风机并设定好初始温度对干燥室进行预热。

1.2.2 热风干燥过程红枣内部温度测定

红枣内部温度是干燥过程中最重要的过程参数之一,可以有效地观察红枣各个阶段的内部温度情况。试验采用 T 型热电偶和 KEYSIGHT 数据采集仪作为红枣内部温度测定和采集的装置。将 T 型热电偶插入到红枣的中心处,每隔 1 h 记录 1 次数据。

1.2.3 红枣热风干燥曲线的测定

目前红枣的热风干燥温度主要集中在 50 ~ 70 °C^[14-15],升温时间维持在 5 ~ 8 h。在已有的研究^[7-9,16-17]基础上,本试验为保证红枣的干燥品质,风速设定为 1 m/s。热风温度分三段变温,第一段为升温阶段,温度从 35 °C 升温到 65 °C,每小时升温 5 °C;第二段温度恒定在 65 °C,持续 14 h;第三段温度恒定在 55 °C,持续到干燥结束。

试验采用单因素分析法,将 35 ~ 65 °C 升温阶段热风相对湿度作为唯一变量。相对湿度通过温湿度自动控制装置进行控制。控制装置可以通过控制雾化器的开启达到控湿的目的。JANJAI 等^[18]在荔枝的干燥过程中研究发现,当热风温度维持在 50 ~ 70 °C 且相对湿度在 10% ~ 25% 时,相对湿度对干燥速率没有显著影响。巨浩羽等^[19]在胡萝卜热风干燥研究中发现,前期预热阶段保持较高的恒定相对湿度值,能快速提高物料温度。中后期干燥阶段保持低的相对湿度进行干燥,可以增大物料表面和干燥介质的水蒸汽分压差,加快干燥速率,能有效缩短干燥时间。CUROCIO 等^[20]在胡萝卜热风干燥试验中发现,当热风温度为 45 °C,相对湿度在 10% ~ 30% 干燥条件下,胡萝卜的干燥时间基本相同。这可能是由于相对湿度改变的范围太低。所以本试验在 35 ~ 65 °C 升温

阶段采用较高恒定湿度,并增加了湿度的调控范围,后期维持低的恒定相对湿度。进行 4 组干燥试验,第一组为持续排湿干燥试验,干燥室内相对湿度控制在 20%。剩下的 3 组为两段式变湿干燥试验,即 35 ~ 65 °C 升温阶段为控湿阶段,3 组相对湿度分别控制在 40%、50%、60%,后续干燥阶段为排湿阶段,相对湿度控制在 20%。对上述 4 种不同工况的试验结果进行比较,研究两段式变湿干燥对红枣热风干燥特性的影响。试验前对红枣进行取样标记,称重。试验过程中每隔 1 h 对样品测 1 次质量。

1.3 试验参数

(1) 采用常压烘箱干燥法(GB 5009·3—2016)计算红枣的初始含水量:

$$X_0 = \frac{m_0 - m_g}{m_0} \quad (1)$$

式中: X_0 , 初始含水量,%; m_0 , 初始质量,g; m_g , 绝干质量,g。

(2) 红枣干燥过程的干基含水量:

$$M_t = \frac{m_t - m_g}{m_g} \quad (2)$$

式中: M_t , 红枣 t 时刻的干基含水量,kg/kg; m_t , 红枣 t 时刻的质量,g; m_g , 红枣的绝干质量,g。

(3) 红枣干燥过程的干燥速率^[21]:

$$V_t = \frac{M_t - M_{t-1}}{T_t - T_{t-1}} \quad (3)$$

式中: V_t , 干燥速率,kg/(kg·h); $T_t - T_{t-1}$, t 时刻与 $t-1$ 时刻之差; M_t , 红枣在 t 时刻的干基含水量,kg/kg; M_{t-1} , 红枣在 $t-1$ 时刻的干基含水量,kg/kg。

1.4 评价指标

(1) 干燥持续时间:在 4 种不同干燥条件下红枣样品达到安全含水率时所需的时间。

(2) 感官品质:按国家标准 GB/T 5835 - 2009《干制红枣》的要求。干枣应明亮有光泽,形状应良好无裂缝且果实饱满。本文采用模糊评判方法得到综合评分,由 9 人小组对干燥后红枣的色泽、气味、糖析出量进行感官评分,评分标准如表 1 所示^[22]。

(3) 红枣在 4 种不同干燥条件下干燥过程的单位能量消耗。

2 结果与分析

2.1 红枣热风干燥特性试验研究

2.1.1 红枣内部温度测定

表 1 感官评分标准
Table 1 Sensory scoring criteria

评分范围	色泽	气味	红枣糖分析出量
8~10	果皮颜色为深红或紫红,鲜艳有光泽	较甜,香味浓厚	不粘手,果皮几乎没有糖分痕迹
6~8	果皮颜色红,有光泽	甜,香味一般	微粘手,果皮有少量的糖分痕迹
4~6	果皮颜色较浅,光泽度差	微甜,微酸	较粘手,果皮有较多的糖分痕迹
<4	果皮颜色较黄或焦褐色,无光泽	较酸	粘手严重,果皮糖分痕迹多

4 种不同情况下红枣内部温度曲线如图 2 所示。红枣内部温度随着干燥室内温度的上升而逐渐上升,随后趋于稳定。待物料温度稳定后,红枣内部温度和干燥室内温度相差 13 ℃ 左右。当干球温度一定时,相对湿度越高,空气焓值越高^[23]。根据傅里叶导热定律可知,当干燥介质焓值越高时,物料升温越快。在控湿阶段,相对湿度恒定为 60% 时,物料升温速度最快。控湿阶段提高相对湿度能使物料内部尽快达到一个较高的温度。控湿阶段结束,该阶段相对湿度为 60% 时,红枣内部温度最高为 53.5 ℃ 左右;该阶段相对湿度为 50% 时,红枣内部温度最高为 51.5 ℃ 左右;该阶段相对湿度为 40% 时,红枣内部温度最高为 49.5 ℃ 左右。持续排湿情况下,红枣内部温度最高为 47.5 ℃ 左右。

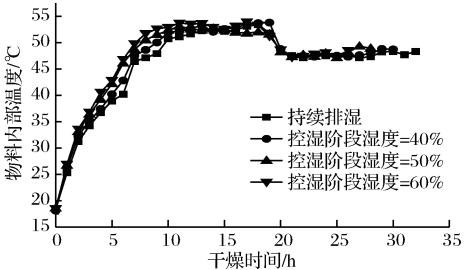


图 2 红枣内部温度曲线
Fig. 2 Red jujube internal temperature curve

2.1.2 红枣热风干燥曲线的测定

初始含水率相同的红枣在 4 种不同干燥条件下,干燥过程中不同时刻的干基含水率的变化如图 3 所示。

4 种情况的干燥时间分别为 32.5、30.8、28.3 和 27.5 h。当控湿阶段维持热风相对湿度为 60%,后续阶段排湿干燥的干燥时间比持续排湿干燥缩短了 5 h 并节约了 15.38%,由此可见,提高控湿阶段的热风相对湿度可以缩短整体的干燥时间。由相对湿度为 50% 和 60% 的干燥时间比较可知,持续提高控湿阶段热风相对湿度对干燥时间减少无显著影响。

在 4 种不同干燥条件下,大枣的收缩均匀性不同。这是因为,在控湿阶段提高相对湿度,可以加快

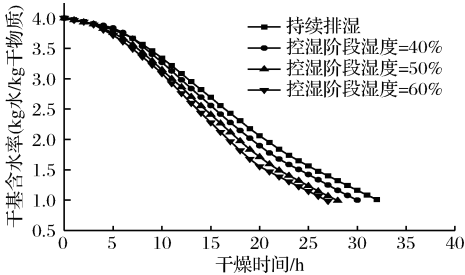


图 3 干燥特性曲线
Fig. 3 Drying characteristic curve

物料内部温度上升,使物料中心和表面的温度、湿度趋于接近。当后续干燥阶段降低干燥介质的相对湿度时,物料中心到表面的温度梯度和湿度梯度也是一致的,这样有利于加速干燥速度,并减少结壳现象的发生^[24]。如图 4-a 所示,在持续排湿干燥条件下,枣的收缩不明显,枣皮变硬、变黑,枣有焦味,小组评定分数为 4 分。这是由于红枣前期在高温低湿条件下造成表皮干硬,内外水扩散不平衡,内部水汽不容易向外扩散,使之充气膨胀,形成了“坐围枣”。如图 4-b 所示,当控湿阶段保持相对湿度为 40% 时,枣成品表皮发黑,这是由于干燥时间过长导致,部分枣表皮有较多糖分析出,枣香味一般、微甜,小组评定分数为 6 分。如图 4-c 所示,当控湿阶段保持相对湿度为 50% 时,红枣外皮变的明亮,少部分表皮有糖分析出,枣味道较甜,小组评定分数为 8 分。如图 4-d 所示,当控湿阶段保持相对湿度为 60% 时,枣的干燥品质最好。无干裂,色泽鲜亮,肉质肥厚,无糖分析出,小组评定分数为 9 分。

2.1.3 红枣干燥速率曲线的测定

在热风温度和风速相同,控湿阶段热风相对湿度不同的情况下,干基含水率与干燥速率的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,红枣的干燥过程大致可以分为 3 个阶段,预热干燥阶段、恒速干燥阶段、降速干燥阶段。

预热干燥阶段从烘干开始一般持续 8~9 h。这个阶段红枣从热风中吸收热量,红枣内部温度升高,红枣中的水分变化很少,随着干燥室内温度的升高,干燥速率逐渐增大。



图4 红枣干燥品质对比

Fig. 4 Comparison of dry quality of jujube

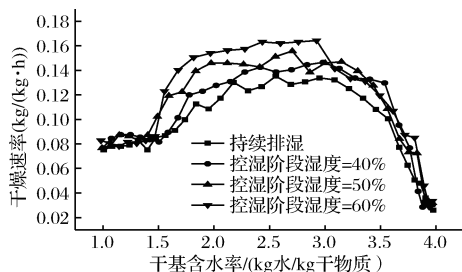


图5 四种工况干燥速率对比

Fig. 5 Comparison of drying rates in four working conditions

恒速干燥阶段持续 10 ~ 12 h, 这个阶段红枣中心

表2 四种工况能耗

Table 2 Energy consumption of four working conditions

试验工况	持续排湿	控湿阶段湿度 40% 排湿阶段湿度 20%	控湿阶段湿度 50% 排湿阶段湿度 20%	控湿阶段湿度 60% 排湿阶段湿度 20%
能耗/(kW·h)	33.81	30.49	25.15	22.05

由表2可知,在干燥过程中干燥温度、风速相同,控湿阶段相对湿度不同的条件下,耗电量不尽相同。随着控湿阶段热风相对湿度的增加,能耗逐渐减小。主要是因为控湿阶段热风相对湿度增加,导致红枣最终干燥时间减少,从而降低了整体能耗。例如当干燥介质相对湿度为60%时比相对湿度为40%时节约能耗34.78%。

3 结论

本文研究了干燥介质相对湿度对红枣热风干燥特性的影响。研究得出,在控湿阶段提高干燥介质的

的温度低于表面温度,水分会在毛细管力的作用下不断向红枣表面迁移,并从表面蒸发,这个过程中红枣的温度基本不变,降水速率基本为定值,因此干燥速率为定值^[25]。在恒速干燥阶段,由于红枣表面含有自由水分,当水分完全汽化时,表皮就会从红枣表面向内退缩,红枣开始发生收缩现象。

降速干燥阶段为红枣干燥过程主要干燥阶段,在此阶段红枣表面没有充足的自由水分,红枣内外存在温度梯度,热量从外向内迁移,红枣内的水分蒸发从内向外迁移,这个阶段红枣中自由水减少,剩余的半结合水、结合水难以析出,故干燥速率逐渐降低。

通过比较4种不同条件下的干燥速率曲线,可以看出控湿阶段不同的热风相对湿度对枣的干燥速率有很大影响。控湿阶段热风相对湿度越大,红枣后期干燥速率越大,相对湿度为60%时的干燥速率最大。根据菲克定律及其边界条件,环境的相对湿度越低,物料与环境之间的蒸汽压差越大,干燥速率越高^[26]。大枣有一层表皮,因此在控湿阶段,大枣在高温和低湿条件下干燥,会使表皮失水过快,变干变硬,阻止大枣内部水分迁移到表面^[27]。高温高湿干燥环境可以减缓控湿阶段红枣表面水分蒸发的速度,使红枣在控湿阶段内部温度快速升高,从而使大枣的内部水分和枣皮的水分均匀蒸发,从而提高大枣的干燥品质。

2.2 能耗比较

通过接入到线路中的电表对4种不同工况下干燥过程中的耗电量进行统计,见表2。

相对湿度可以加快物料内部的升温速度,使枣内外水分均匀蒸发,减少结壳现象的发生。同时也有利于枣后期的水分迁移和均匀收缩。在控湿阶段提高干燥介质相对湿度、排湿阶段降低相对湿度,可以有效地减少红枣的烘干时间,从而降低整个干燥过程的能耗。当控湿阶段相对湿度为60%时,干燥时间比整个阶段持续排湿干燥减少了15.38%,能耗降低了34.78%。

参 考 文 献

[1] 黄哲真. 红枣的营养成分及功用价值[J]. 科技视界,

- 2014(29):325-325.
- [2] 王海新,张学军,鄢金山,等. 国内红枣干燥技术的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2015,37(8):249-253.
 - [3] WOJDYLO A, FIGIEL A, LEGUA P, et al. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of dried jujube fruits as affected by cultivar and drying method [J]. Food Chemistry, 2016, 207:170-179.
 - [4] ZOZIO S, SERVENT A, HUBERT O, et al. Changes in antioxidant activity during the ripening of jujube (*Ziziphus mauritiana* Lamk.) [J]. Food Chemistry, 2014, 150(2):448-456.
 - [5] CHUMROENPHAT T, KHANPROM I, BUTKHUP L. Stability of phytochemicals and antioxidant properties in ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) rhizome with different drying methods[J]. Journal of Herbs Spices & Medicinal Plants, 2011, 17(4):361-374.
 - [6] DIAMANTE L M, IHNS R, SAVAGE G P, et al. A new mathematical model for thin layer drying of fruits[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(9):1956-1962.
 - [7] 刘立果,张学军,孙杰,等. 红枣热风干燥工艺的试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(3):258-263.
 - [8] 弋晓康,吴文福,崔何磊,等. 红枣热风干燥特性的单因素试验研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(10):148-151.
 - [9] 木合塔尔·米吉提,吾尔泥沙·吐尼牙孜,玛依努尔·托乎提. 红枣热风干燥特性的单因素试验分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(6):178-182.
 - [10] 王庆惠,李忠新,杨劲松,等. 圣女果分段式变温变湿热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3):271-276.
 - [11] DAI Jianwu, RAO Junquan, WANG Dong, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. Drying Technology, 2015, 33(3):365-376.
 - [12] KOWALSKI S J, MUSIELAK G, BANASZAK J. Heat and mass transfer during microwave-convective drying [J]. Aiche Journal, 2010, 56(1):24-35.
 - [13] 中华人民共和国卫生部. GB 5009.3—2016. 食品安全国家标准食品中水分的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
 - [14] 鲁洁,孙剑锋,王颀,等. 热风干燥对阜平红枣品质的影响及其数学模型的构建[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1):97-102.
 - [15] 牟国良,张学军,于蒙杰,等. 我国红枣干燥技术的现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2014,35(1):16-21.
 - [16] 韦玉龙,于宁,陈恺,等. 热风干制对红枣收缩特性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(22):114-118;123.
 - [17] 鲁洁,孙剑锋,王颀,等. 热风干燥对阜平红枣品质的影响及其数学模型的构建[J]. 食品工业科技, 2013, 34(1):97-102.
 - [18] JANJAI S, PRECOPPE M, LAMLERT N, et al. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89(3):194-201.
 - [19] 巨浩羽,张茜,郭秀良,等. 基于监测物料温度的胡萝卜热风干燥相对湿度控制方式[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4):269-276.
 - [20] CURCIO S, AVERSA M, CALABRO V, et al. Simulation of food drying: fem analysis and experimental validation [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(4):541-553.
 - [21] 王汉羊,刘丹,于海明. 山药微波热风耦合干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学, 2018, 39(15):115-121.
 - [22] 于蒙杰,张学军,李超新,等. 红枣热风干燥特性的试验研究[J]. 农机化研究, 2014,36(11):176-179.
 - [23] 李长友. 粮食热风干燥系统火用评价理论研究[J]. 农业工程学报,2012,28(12):1-6.
 - [24] 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):296-304.
 - [25] BIALBRZEWSKI I, ZIELINSKA M, MUJUMDAR A S, et al. Heat and mass transfer during drying of a bed of shrinking particles-simulation for carrot cubes dried in a spout-fluid bed drier [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2008, 51(19/20):4704-4716.
 - [26] JU Haoyu, ZHANG Qian, MUJUMDAR A S, et al. Hot-air drying kinetics of yam slices under step change in relative humidity[J]. International Journal of Food Engineering, 2016, 12(8):783-792.
 - [27] 刘照朋. 房式红枣烘房的设计与研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2014.

Effects of relative humidity of hot air on drying characteristics of red jujubes

LIU Pin, LIU Yin^{*}, ZHANG Yan, JIU Man

(School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT Using Xinzheng jujubes as experimental material, the effects of different relative humidity (continuous dehumidification, 40%, 50%, 60%) on internal temperature rise, drying time, energy consumption, and sensory quality of jujubes were studied. The jujubes were dried at 35–65 °C with constant wind speed (1 m/s) and humidity. The internal temperature of jujube was measured by T-type thermocouple and data acquisition instrument, and the energy consumption during drying was recorded by electric energy meter. The results showed that increasing relative humidity of hot air could increase the internal heating rate of red jujubes and avoid skins hardening. Moreover, the internal moisture migration rate of red jujubes increased, which improved overall drying rate, shortened the drying time and reduced energy consumption during drying. When the relative humidity was 60%, the drying time and energy consumption during the whole stage reduced by 15.38% and 34.78%, respectively, compared against that of continuous dehumidification, and the dried jujube products shrank evenly with bright color. Overall, current research provides a theoretical basis for improving the drying rate and drying quality, as well as for reducing energy consumption when drying jujubes.

Key words jujube; hot air drying; drying speed; humidity control

(上接第 184 页)

Effects of different pretreatments on extracting *Moringa Oleifera* seed oil and relevant mechanisms

SUN Yan, QIN Xiaoli^{*}, ZHONG Jinfeng, LIU Xiong^{*}

(College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

ABSTRACT This study aimed to improve the extraction efficiency of *Moringa oleifera* seed oil and reveal the mechanisms for different pretreatment methods. The *Moringa oleifera* powder was pretreated by microwave, high pressure, and ultrasound, respectively, followed by aqueous enzymatic extraction. The structures of *Moringa oleifera* powder with and without pretreatments were examined by scanning electron microscopy. The results showed that compared with traditional aqueous enzymatic extraction method, microwave, high pressure, and ultrasonic pretreatments increased the oil extraction rate by 5.64%, 9.03%, and 9.90%, respectively. Moreover, it was found that all these three pretreatments could severely damage the structure of *Moringa oleifera* seeds to different degrees. In particular, ultrasonic treatment led to smaller fragments and obvious holes in *Moringa oleifera* seed particles, while high pressure treatment resulted in homogeneous tablet-structure. In conclusion, high pressure and ultrasound can effectively destroy *Moringa oleifera* seed cell walls to improve the extraction efficiency of oil, which provides a new idea for extracting oils in food industries.

Key words *Moringa oleifera* seed oil; microwave; high pressure; ultrasonic; aqueous enzymatic method