

附加回风隔断装置的冷风机融霜试验

Experimental research on defrosting process of cooling fan with return air cover and heat insulation device

董立桥¹

谈向东¹

厉建国^{1,2}

万锦康^{2,3}

DONG Li-qiao¹ TAN Xiang-dong¹ LI Jian-guo^{1,2} WAN Jin-kang^{2,3}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 农业部冷库及制冷设备质量监督检验测试中心, 上海 201306;

3. 农业部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室〔上海〕, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Quality Supervision, Inspection and Testing Center for Cold Storage and Refrigeration Equipment [Shanghai], Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China; 3. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Aquatic Product on Storage and Preservation [Shanghai], Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China)

摘要:为了减小电热融霜产生的融霜热对冷库内温度场的影响,为低温库内的一台冷风机设计一套回风隔断装置,并在不同工况下进行试验,研究有无回风隔断装置库内冷风机融霜结束后内外温度场分布、融霜开始至恢复初始设定温度库内温度场的波动以及电热融霜结束后的能耗情况。结果显示,增加回风隔断保温装置后,冷风机盘管内部温度场分布较均匀,冷风机外部温度场的温度波差减小了 3.2℃,融霜时间缩短了近 360 s,融霜能耗降低了 9.54%,说明回风隔断装置在融霜过程中在稳定温度场波动、缩短融霜时间和降低能耗上起到了一定的作用。

关键词:冷库;回风隔断装置;冷风机;电热融霜;温度场

Abstract: In order to reduce the effect of electric defrosting heat on the cold storage temperature change during defrosting process, a heat insulation defrosting device with a return air cover and outlet baffle was designed, through the different condition of experiments, then the questions that how the return air cover and partition device to influence the temperature field around the air-cooler, the cold storage temperature and the consumption of electric heating defrosting were studied through comparing the experimental data whether the return air cover and partition device was used or not. The results indicate that after using the return air cover and partition device, the temperature distribution inside the cooling fan coil is more uniform, the fluctuating temperature field outside the fan is decreased 3.2℃. meanwhile, the defrosting time with the device is shortened by nearly 360 s and reduce energy consumption around 9.54%, which

proves that the return air cover and partition device can stabilize the storage temperature and shorten the defrosting time and energy consumption saving in the defrosting process.

Keywords: cold storage; insulation device; cooling fan; electric defrosting; temperature field

冷库作为冷藏链系统中至关重要的一个环节,在食品的储藏过程中,不仅需要在储量上达到要求,更为关键的是在储藏要求上达标。而在冷库内的换热器进行融霜时,库内温度可能受到融霜产生热量的影响,发生较大的温度波动,这种情况的发生不仅不利于库内食品的存储,影响食物的品质,还会在冷库运行过程中消耗更多的能量^[1-2]。

结霜在冷库制冷系统中是常见现象,Sommers等^[3]研究发现:在结霜的前期,形成的柱状或是针状的霜层会通过增加空气的扰动达到强化传热的效果。但是随着霜层的生长,霜层会呈现出无规则的加厚,加大冷风机与空气的传热热阻,增加气流流通阻力,冷风机传热性能下降,制冷效率也会降低。因此,适时的除霜显得尤为重要。冷库中用于冷风机的除霜方式很多,常见的有电加热除霜、热气除霜、淋水法、中止制冷循环法、热气-水融霜法^[4],除此之外,谭海辉等^[5]研究发现超声除霜也是一种应用在翅管式换热器的高效、低能耗除霜方式。无论哪种融霜方式,融霜时所产生的热量极易流入库内的冷环境中,破坏库内的温度场,损失了用于融霜的热量,增加了下一轮制冷周期的冷负荷^[6-8],除霜后再次降温过程缓慢、能耗较大、影响库内物品的贮藏质量。

鉴于以上研究,为了减少融霜产生的热量对库内温度场的影响,王栋等^[6]设计了一套电动隔断装置阻止融霜时热量对周围冷环境的影响,申江等^[7]设计了一套冷风机外围包裹

作者简介:董立桥,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:谈向东(1961—),男,上海海洋大学副教授,硕士生导师,本科。E-mail: xdtan@shou.edu.cn

收稿日期:2018-01-23

保温材料的保温融霜装置。借鉴以上2种装置的优点,本试验针对上海海洋大学已建的一-35℃双级低温冷库中的一台冷风机设计一套可拆卸的回风罩加出口盖板的保温隔断装置。通过对比不同工况下有无回风隔断装置库内冷风机融霜结束后内外温度场分布、融霜开始至恢复初始设定温度库内温度场的波动以及电热融霜结束后的能耗情况,验证回风隔断装置在以上方面的优越性。

1 试验装置与方案

1.1 试验装置介绍

图1为试验用冷风机外型实图,冷风机结构参数:翅片厚度0.35 mm、翅片间距6.35 mm、翅片总数163片、外表面传热面积34.1 m²、制冷机管15.88 mm×1 mm、管排数5排、分路数6路、总管数60根、风机有2个、风叶直径400 mm、电机电压380 V、单台功率520 W。冷风机所配的电热融霜管规格和位置可见图3,除霜时电热管融霜功率为6.3 kW。在排水管道内设有电加热带,用于融霜水的排出。从图2中看出,冷风机附加的回风隔断装置分为两部分:一部分是在冷风机进口增设可拆卸特殊结构的回风罩装置,冷风机外面用钢板包围,回风罩与冷风机外壁接触处采用保温材料;另一部分是在冷风机出口处增设带有出风盖板的保温装置,融霜时风机停止运行,此时盖板封闭,可以近似认为空气无法通过出风口,起到冷热气流的隔断作用。当制冷时,盖板在风机的作用下再次打开。

1.2 温度测点布置

本试验采用T型铜-康铜热电偶进行测量,精度为±0.5℃,温度记录仪型号为安捷伦34972A,扫描频率为

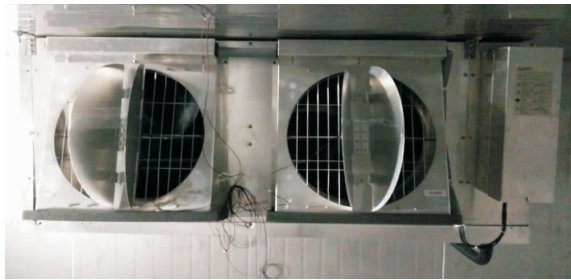
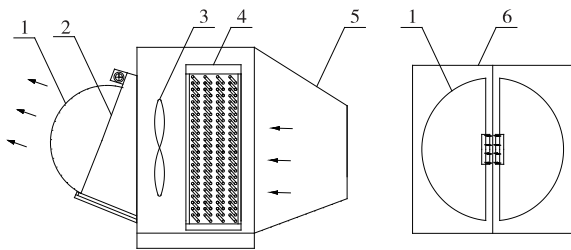


图1 试验用冷风机外型实图

Figure 1 Experiment with the cooling fan of the actual figure



1. 冷风机出风口盖板 2. 冷风机出风口 3. 风机 4. 蒸发器 5. 回风罩 6. 单个出风口局部放大图

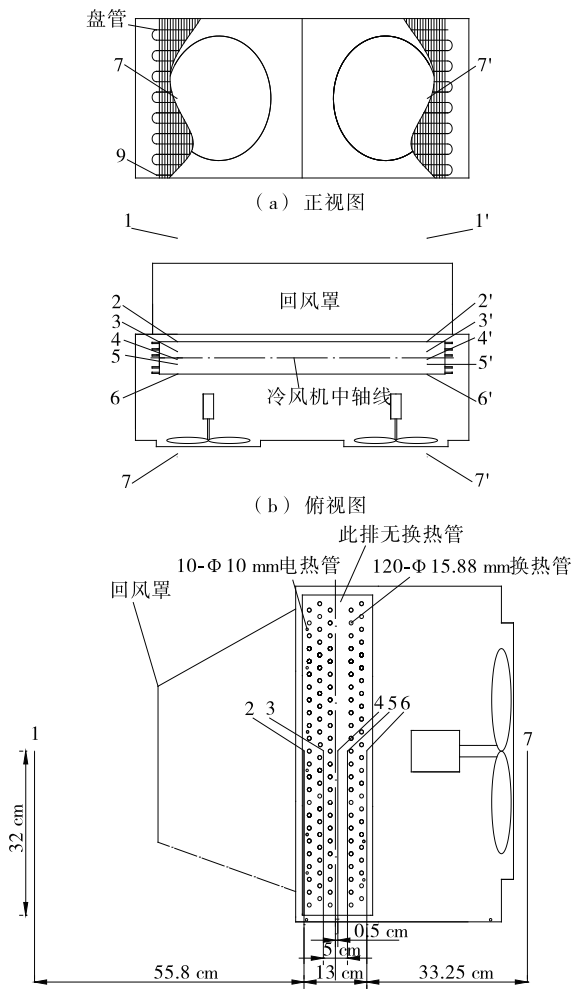
图2 试验回风隔断装置原理简图

Figure 2 Return air cover and partition device adopted in the experiment principle diagram

10 s/次,购置于是德科技(中国)有限公司,采集的数据可保存在Excel表格中,用于后期的数据处理。

对于冷库库内温度场,由于其在水平和垂直方向上都存在着不均匀的特点,所以在库内的垂直方向会出现温度梯度。由于本试验冷库内部尺寸为4.85 m×3.85 m×3.55 m(长×宽×高),对于-28℃以下且库房净高在3.5~4.0 m的冷库,竖直方向的平均温度值可以定义为库体中央标高1.5 m处的温度值^[9],故把测量库体平均温度的点布置在此处。

图3和表1是热电偶即温度测点在冷风机内外的布置情况,温度测点2、3、4、5、6点在冷风机内部,这些测点都在出风盖板的内侧按一定的间距排列,保证了在融霜时,可以精确地测量出风盖板封闭后冷风机内部的温度分布情况;在冷风机出风口设置了网罩,方便出风口温度测点7的布置,同时在进风口回风装置的外侧布置了温度测点1和出风口出风盖板的外侧即冷库中央布置了温度测点8,这2个温度测点主要用于记录冷风机外部的温度情况。为了数据的完整性和准确性,对于除了温度测点8之外的所有测点,按照



(c) 左视图(比例比a、b图放大1倍)

图3 温度测点及电加热管分布示意图

Figure 3 The diagram of temperature measuring point and electric heating tube distribution

表 1 冷风机内外热电偶的分布

Table 1 The distribution of the thermocouples inside and outside of cooling fan

序号	热电偶位置	位置/cm
1	回风罩外侧左进风 1	-62.30
2	回风罩内侧左进风 2	-6.50
3	左进风 3	-2.50
4	中轴线前侧左 4	0.50
5	中轴线前侧左 5	2.50
6	左风机后	6.50
7	左出风 7	39.75
1'	回风罩外侧右进风 1	-62.30
2'	回风罩内侧右进风 2	-6.50
3'	右进风 3	-2.50
4'	中轴线前侧右 4	0.50
5'	中轴线前侧右 5	2.50
6'	右风机后	6.50
7'	右出风 7	39.75
8	库中央	172.70
9	盘管底部回路出口	

冷风机左右对称的位置分布,并且标记为 1、2、3、4、5、6、7 和 1'、2'、3'、4'、5'、6'、7',最后可以取对称点的均值为试验数据。从图 3 中可以看出,各对称测点高度距离冷风机底部为 32 cm,而表 1 中的热电偶位置都是相对于图 3 中冷风机中轴线的相对位置,以便将融霜结束后的温度场分布情况直观地表现在图 4 中。温度测点 8 由于位于库体中央,可以记录库内平均温度在整个过程中的变化情况。制冷剂出冷风机盘管和冷风机盘管内平均温度 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可以作为各工况下融霜结束的依据,因此,温度测点 9 布置在冷风机盘管底部最易结霜的回路上来判定是否融霜结束^[10-11]。

2 试验结果及分析

2.1 温度场对比

图 4 显示了在库内温度为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5 种工况下,电热融霜结束后有无回风隔断装置冷风机周围温度场的分布情况。很明显地看出,有无此装置冷风机内外温度场的分布差别很大:从刚进入冷风机的入口区($-62.30\sim-6.50\text{ cm}$)有回风隔断装置的温度上升趋势明显比无回风隔断装置的趋势陡,这是因为有回风隔断的系统从冷风机内部逸出的热量大部分被回风隔断装置保留在了内部,对回风罩外部入口处的温度场影响较小,又由于冷风机盘管入口的边缘安装了电加热管,有无回风隔断装置在此位置温度相近,所以有回风隔断装置的系统明显比无回风隔断装置的系统在入口处温度爬升的斜率大。在冷风机盘管区($-6.50\sim 6.50\text{ cm}$),因为在冷风机盘管的边缘两侧都安装了电加热管,所以此区域的温度明显高于其他区域的。又同一工况温度下,电热管功率恒定,加热量基本一致,但无回风隔断装置系统融霜热量散失到库内冷环境的较多,导致融霜时

间延长。有回风隔断装置的系统,因为底部的部分热量释放到盘管区的上半部分,在回风隔断装置的作用下,热量得以保留,所以融霜结束后有回风隔断装置的盘管区温度出现了峰值较高但是分布平缓的情况,同时这部分热量用于融霜,所以融霜时间上得以缩短^[12-13]。2 种系统在风机区($6.50\sim 39.75\text{ cm}$)和冷库内部($39.75\sim 172.70\text{ cm}$)温度分布基本相同,但从位置 172.70 cm 的测点可以看出,电热融霜结束后,有回风隔断装置的库内平均温度要比无回风隔断装置的低了 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明增加回风隔断装置后减小了融霜过程对冷库库温的影响。

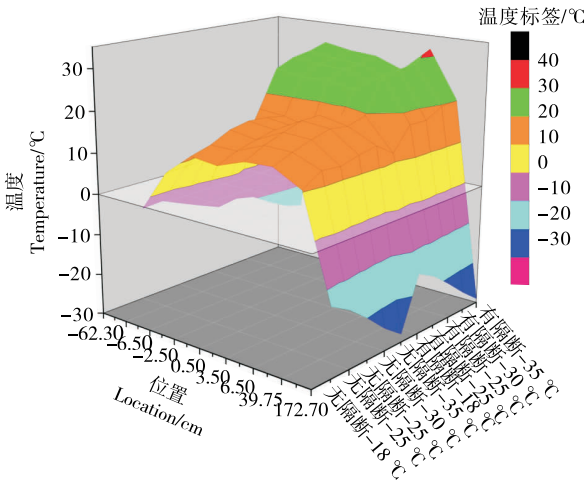


图 4 电热融霜结束后各测点温度分布图

Figure 4 The temperature distribution of measuring points when the end of the defrosting

图 5 反映了各工况下融霜开始至恢复初始设定温度过程中冷库内平均温度的波动情况。可以看出,有回风隔断装置的系统比无回风隔断装置的系统在工况为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度波动峰值分别降低了 $2.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $3.78\text{ }^{\circ}\text{C}$,融霜时间上也平均缩短了近 6 min ,说明有回风隔断装置的冷风机对冷库内的温度场影响减小,并且在融霜能耗上有一定的节能作用。通过以上分析可知:电热融霜结束的时间虽短,但是融霜结束后加热管仍会继续加热一段时间,从冷风机内部溢出的热量对库内的温度场产生了强烈的影响,故回风隔断装置在减少冷库内温度场的波动上起到了一定的作用。

2.2 融霜耗能对比

为了验证回风隔断装置在融霜能耗上的节能效果,利用 DZFC-1 型电能综合分析测试仪与冷库电控设备的连接,可以得到各试验工况下电热融霜过程中所需能耗,见图 6。

由图 6 可知,电热融霜能耗随着库温的下降呈现出递增的趋势,这是因为随库温的降低,排管翅片表面霜层加厚,向周围散热的温差加大,从而融霜能量增加。增加回风隔断装置后,在相同的工况下融霜能耗显著低于未增加隔断装置的。从图 6 中可知,在工况 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,增加回风隔断装置后,电热融霜能耗分别缩减了 7.48% 、 12.87% 、 9.11% 、 9.85% 、 8.37% ,其原因为在各试验

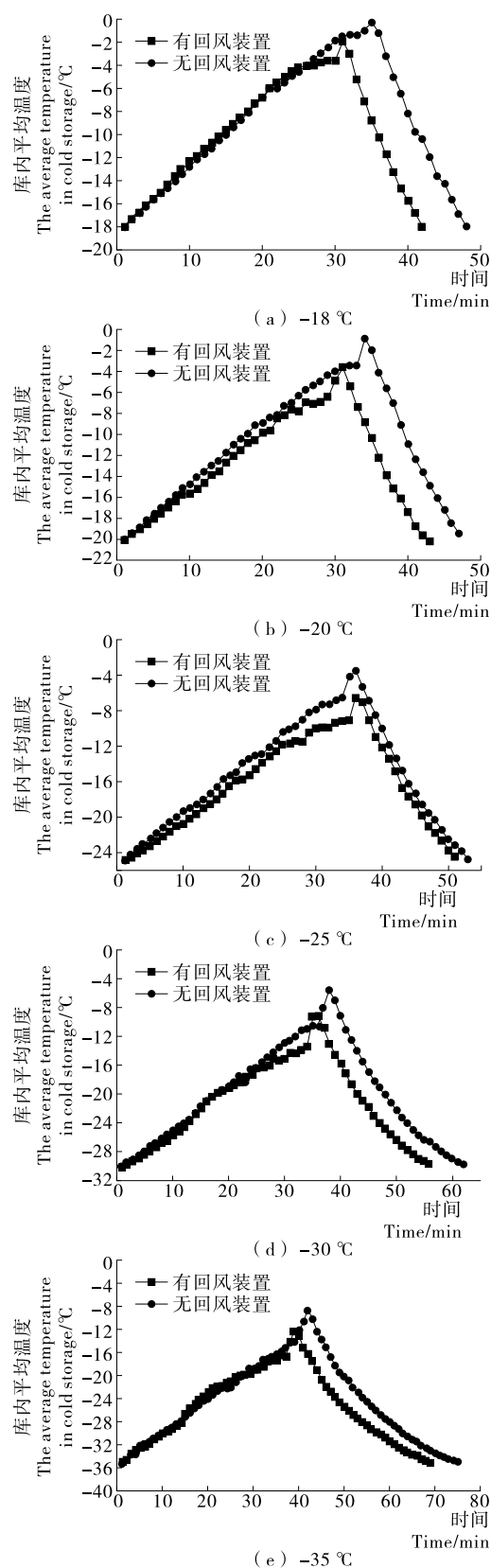


图5 各工况下有无回风隔断装置融霜过程中库内平均温度波动曲线

Figure 5 The conditions for return air cover and partition device in the process of the rolls average temperature fluctuation curve

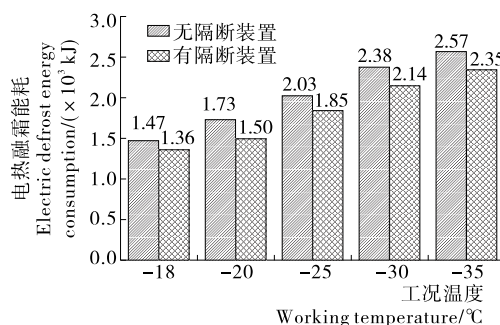


图6 各工况温度下有无隔断装置的电热融霜能耗对比图

Figure 6 The chart of defrosting energy consumption comparison with Insulation device or not at different working condition

工况下,电加热功率基本相同,融霜时间缩短,电加热能耗降低。又加之实际运行的冷库系统不断地进行融霜到再降温制冷的循环,无回风装置系统溢出的热量成为了下一制冷周期的冷负荷,导致有隔断装置系统的压缩机功率偏小^[14]。因此,有回风隔断装置的系统在电热融霜能耗方面有突出优势。

3 结论

对一台低温库库内冷风机结霜特性进行了试验研究,通过比较有无回风隔断装置在库内工况分别为-18, -20, -25, -30, -35 °C 5种条件下,电热融霜结束时冷风机内外温度场的分布、融霜开始至恢复初始设定温度库内温度场的波动以及电热融霜结束后系统的能耗情况,得出以下结论:增加回风隔断装置后,冷风机盘管内部测点的温度明显提高且分布均匀,提高了电加热的热量利用率,缩短了融霜时间;降低了对冷风机外部温度场的破坏,将库内温度场的波动降低了近3.2 °C;在融霜开始至恢复初始设定温度值时间上缩短了近360 s,电热融霜的能耗和压缩机功率降低,系统运行的总能耗降低了近9.54%,与申江等^[7]设计的附加保温装置得出的试验结论基本相同,并在缩短融霜时间上又提高了60 s,说明本试验设计的回风隔断装置在系统融霜过程中同样具有降低库内温度波动以及减少融霜时间的作用,但相较于后者,回风隔断装置具有易安装、易拆卸、成本低等优点。

参考文献

- [1] 刘恩海, 南晓红, 何媛. 低温冷风机结霜特性的研究及其融霜方法的改进[J]. 制冷学报, 2007, 28(2): 56-60.
- [2] 李振华, 李征涛, 王芳, 等. 冷库热气融霜与电热融霜的对比分析[J]. 制冷学报, 2007, 28(2): 56-60.
- [3] SOMMERS A D, JACOBI A M. Air-side heat transfer enhancement of a refrigerator evaporator using vortex generation[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(9): 1 006-1 017.
- [4] 庄友明. 食品冷库除霜方法及其能耗分析[J]. 集美大学学报: 自然科学版, 2006, 11(1): 62-65.
- [5] TAN Hai-hui, TAO Tang-fei, XU Guang-hua, et al. Experimental study on defrosting mechanism of intermittent ultrasonic resonance for a finned-tube evaporator [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52: 308-317.

(下转第174页)

3 结论

本试验以湖北道地药材——襄麦冬块根为研究材料, 采用响应面法优化了总甾体皂苷提取工艺, 并对提取物的体外清除自由基能力进行了评价。结果表明, 当采用超声处理时间 0.5 h、液料比 19.5:1 (mL/g)、超声处理温度 39.7 °C、索氏提取时间 3 h 处理襄麦冬块根粉碎物时, 提取物中甾体皂苷含量最高, 此时, 山麦冬皂苷 B 可达到 0.073 8 mg/mL, 即 30 mL 的提取物溶液中山麦冬皂苷 B 的含量为 2.21 mg, 提取率达到 22.14%。

此外, 抗氧化活性测试也表明, 襄麦冬甾体皂苷对 OH 自由基、O₂⁻ 自由基、DPPH 自由基以及 ABTS 自由基均具有一定的体外清除能力, 且清除活性与甾体皂苷的浓度呈线性关系。尤其对 OH 自由基和 O₂⁻, 在设定的最高浓度 (1.28 mg/mL) 时, 清除率均超过 50%, 分别达到 59.66% 和 52.3%。

本试验对襄麦冬甾体皂苷所做的提取工艺优化, 仅仅是采用响应面法进行的前期实验室研究, 考虑到工业生产应用实际, 下一步的工作将从提取、分离、纯化融合工艺参数优化, 以及降低生产成本等方面展开, 以期能建立一套产能高、成本低的成熟生产工艺。

参考文献

- [1] 刘星, 余江丽, 刘敏, 等. 近 10 年甾体皂苷的生物活性研究进展[J]. 中国中药杂志, 2015, 40(13): 2 518-2 523.
- [2] 张伟, 宋文静, 武嘉庚, 等. UPLC-MS/MS 法检测妇康宁片中掺加的山麦冬[J]. 中成药, 2017, 39(4): 867-869.
- [3] 吴发明, 杨瑞山, 李敏, 等. 麦冬主流品种药材质量比较研究[J]. 中国药理学杂志, 2017, 52(6): 447-451.
- [4] 吴发明, 张思获, 曾俊, 等. HPLC-ELSD 法测定不同产地麦冬中 4 种代表性成分的含量[J]. 药物分析杂志, 2016, 36(8): 1 370-1 376.
- [5] 陈乃东, 陈琼, 何健. 高效毛细管电泳法拆分 25R、25S 鲁斯可皂苷元初步研究[J]. 药物分析杂志, 2014, 34(5): 805-812.
- [6] 吴弢, 余伯阳, 程志红, 等. HPLC-ELSD 法测定湖北麦冬中主要皂苷的含量[J]. 中草药, 2000, 31(3): 175-177.
- [7] 林以宁, 朱丹妮, 寇俊萍, 等. 麦冬类药材皂苷元含量与其抑制中性粒细胞呼吸爆发的相关性[J]. 中国药科大学学报, 2007, 38(6): 549-552.
- [8] 王小刚. 湖北麦冬种植优化和遗传多样性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 25-30.
- [9] 兰宏昌. 多效唑应用于湖北麦冬种植的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 46-48.
- [10] 朱业芹. 湖北麦冬关键种植技术研究[D]. 武汉: 湖北中医学院, 2007: 28, 35, 39.
- [11] 刘霞. 湖北麦冬规范化种植及其提取物的降血糖作用研究[D]. 武汉: 湖北中医学院, 2009: 41-44.
- [12] 刘霞, 张安萍, 孙江桥, 等. 湖北麦冬不同提取物降血糖作用的研究[J]. 中国医院药学杂志, 2009, 29(9): 719-721.
- [13] 林韵涵, 李崇明, 李晓东, 等. 湖北麦冬有效部位总皂苷的提取纯化工艺研究[J]. 中药材, 2013, 36(5): 803-806.
- [14] 刘霞, 张琼光, 向阳, 等. 大孔吸附树脂同步提取湖北麦冬总多糖和总皂苷[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(5): 1 235-1 236.
- [15] 聂伦, 熊尚森, 余海忠. 襄麦冬不同极性部位粗提物抗氧化性能初步评价[J]. 山地农业生物学报, 2013, 32(1): 32-34, 51.
- [16] 葛智超, 陈宏伟, 朱蕴兰, 等. 富锗金针菇菌丝体多糖的分离纯化及对自由基的清除能力[J]. 农业工程, 2017, 7(3): 100-104, 112.
- [17] 祁小妮, 马晓红, 李振亮, 等. 响应曲面优化丹参多糖提取工艺及抗氧化活性分析[J]. 南方农业学报, 2016, 47(11): 1 926-1 931.
- [18] 邹光友. 麦冬须根食用的综合开发利用[J]. 食品科学, 1992(2): 33-36.
- [19] 陈开霜, 陈美芳, 于博, 等. 转谷氨酰胺酶在凝固型麦冬酸奶中的应用研究[J]. 中国酿造, 2017, 36(9): 158-162.
- [20] 周婷, 刘统, 林丹洁, 等. 鱼腥草甲醇提取物体外抗氧化性及抑菌活性评价[J]. 山地农业生物学报, 2012, 31(1): 87-90.
- [21] 陈留勇, 孟宪军, 贾薇, 等. 黄桃水溶性多糖的抗肿瘤作用及清除自由基、提高免疫活性研究[J]. 食品科学, 2004, 25(2): 167-170.
- [22] 余海忠, 刘统, 林丹洁, 等. 鄂西北产鱼腥草提取物体外抗氧化性的四种化学方法评价[J]. 中国野生植物资源, 2012, 31(1): 22-25.
- [23] 白海娜, 王振宇, 刘瑞海, 等. 白藜芦醇与黑木耳多糖协同清除 ABTS 自由基活性的研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(3): 64-68.
- [24] YU Bo-yang, QIU Sheng-xiang, ZAW Kyaw, et al. steroidal glycosides from the subterranean parts of *Liriope spicata* var. *prolifera*[J]. Phytochemistry, 1996, 43(1): 201-206.
- [6] 王栋, 陶乐仁, 刘训海. 隔断装置对冷风机电热融霜影响的实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(6): 81-95.
- [7] 申江, 路坤仑, 李慧杰, 等. 附加保温融霜装置的冷风机融霜实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(4): 104-107.
- [8] 刘训海, 姜敬德, 朱华, 等. 低温冷库电热融霜与热气融霜的对比试验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(3): 58-62.
- [9] XIA Yan-ping, ZHONG Yong-fang, HRNJAK P S, et al. Frost, defrost, and refrost and its impact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(7): 1 066-1 079.
- [10] WANG Dong, JIANG Jing-de, TAO Le-ren, et al. Experimental investigation on a novel cold storage defrosting device based on electric heater and reverse cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 1 267-1 273.
- [11] 王栋, 陶乐仁. 有无隔断装置对冷风机热气融霜的影响[J]. 低温与超导, 2014, 42(2): 56-61.
- [12] MELO C, KNABBEN F T, PEREIRA P V. An experimental study on defrost heaters applied to frost-free household refrigerators[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 239-245.
- [13] 王剑, 臧润清. 液体冷媒融霜制冷系统融霜过程制冷温度变化规律的实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 91-95.
- [14] SONG Meng-jie, DENG Shi-ming, XIA Liang. A semi-empirical modeling study on the defrosting performance for an air source heat pump unit with local drainage of melted frost from its three-circuit outdoor coil[J]. Applied Energy, 2014, 136: 537-547.

(上接第 102 页)