

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.02.008

低温等离子体技术改善糙米蒸煮品质 工艺优化及热力学特性研究

刘明¹, 孟宁^{1,2}, 朱运恒¹, 刘艳香¹,
张培茵², 谭斌¹, 方秀丽¹

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 北京 100037;
2. 哈尔滨商业大学 旅游烹饪学院 黑龙江 哈尔滨 150076)

摘要: 为解决糙米蒸煮时间长、口感粗糙等问题, 提出以低温等离子体处理糙米的新技术。以糙米为原料, 探究低温等离子体工艺中辉光强度、处理时间和水分含量对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响规律, 并通过差示扫描量热法(DSC)分析白米、糙米和低温等离子体处理后糙米的热力学性质。在单因素实验的基础上采用正交实验优化得到的低温等离子体工艺参数为: 辉光强度 1.8 A, 处理时间 2 min, 水分含量 9.33%, 在此条件下蒸煮时间为 25.31 min, 固形物损失率为 19.18 mg/g。热力学实验分析发现低温等离子体处理可以降低糙米的热相变温度、终止温度和焓值。可为低温等离子体技术在糙米生产中应用提供参考。

关键词: 低温等离子体; 糙米; 蒸煮品质; 工艺优化; 热力学特性

中图分类号: TS213.3; TS210.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2020)02-0049-06

Process optimization and thermodynamic property analysis of brown rice cooking quality improvement by low temperature plasma technology

LIU Ming¹, MENG Ning^{1,2}, ZHU Yun-heng¹, LIU Yan-xiang¹,
ZHANG Pei-yin², TAN Bin¹, FANG Xiu-li¹

(1. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;
2. Harbin University of Commerce, College of Tourism and Cooking, Harbin, Heilongjiang 150076, China)

Abstract: In order to solve the problems of long cooking time and rough taste of brown rice, a new technology based on low temperature plasma treatment was put forward. Taking brown rice as raw material, the effects of glow intensity, treatment time and moisture content in low-temperature plasma processing on cooking time and solid loss rate of brown rice were studied, and the thermodynamic properties of white rice, brown rice and low-temperature plasma treated brown rice were analyzed by DSC. On the basis of single factor experiment, orthogonal experiment parameters of optimizing the low-temperature plasma process was glow intensity 1.8a, treatment time 2 min, moisture content 9.33%, then cooking time was about 25.31 min under this condition, solid loss rate was 19.18 mg/g. Thermodynamic analysis shows that low temperature plasma treatment can reduce the thermal phase transition temperature, termination temperature and enthalpy of brown rice. The results can be used as reference for low temperature plasma in brown rice production.

Key words: low temperature plasma; brown rice; cooking quality; process optimization; thermodynamic characteristic

收稿日期: 2019-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0400802); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2017ZX1725)

作者简介: 刘明, 1980年出生, 男, 博士, 副研究员, 研究方向为粮食加工。

通讯作者: 谭斌, 1972年出生, 男, 博士, 研究员, 研究方向为粮食加工。

糙米是稻谷脱壳后的全谷物颗粒米,由麸皮层、胚和胚乳组成。相比较于白米,糙米在加工过程中最大限度的保留了稻谷的营养物质,其降血糖、降血脂等作用受到相关学者和广大消费者的肯定^[1],但由于糙米皮层中含有较多的粗纤维和蜡质层,严重阻碍了蒸煮过程中水分吸收,造成蒸煮时间长、口感粗糙、难消化、食用不方便的缺点,难以适应现代人的饮食习惯,作为主食的消费接受度很低^[2]。

等离子体是指气体在外界高温、电场、磁场和辐射的作用下电离产生的电离度超过 0.1% 的气体,由电子、离子、激发态原子、自由基和中性粒子等组成,整体呈电中性,被称为继“固、液、气”三态之外的物质第四态。离子温度与室温相当,带电粒子的温度为 1~10 eV 的物质状态称为低温等离子体,整个体系表现为常温^[3]。低温等离子体中存在的带电粒子和活性物质等对于缩短糙米蒸煮时间,改善糙米蒸煮品质具有积极的作用。Chen 等^[4]通过对糙米进行不同电压的等离子体处理实验,结果表明糙米的蒸煮时间有明显下降。Chen 等^[5]又以长粒香糙米为研究对象,发现随着处理电压或处理时间的增加,糙米的蒸煮时间均呈现先减小后增大的趋势,在 4 kV 和 2 min 糙米蒸煮时间最少。这不仅验证了之前实验的结果,还为低温等离子体技术在全谷物研究中提供了参考。Thirumdas 等^[6]通过研究低温等离子体技术对糙米蒸煮品质的影响,发现该技术在降低糙米的蒸煮时间方面效果显著。目前关于低温等离子体技术在糙米中的应用多局限于不同辉光强度和處理时间对糙米品质的影响规律,未考虑到糙米样品自身水分的影响,因此低温等离子体处理工艺条件对生产效率及蒸煮时间的影响规律仍需深入研究。

研究采用低温等离子体技术处理糙米,考察辉光强度、处理时间和水分含量对糙米最佳蒸煮时间和固形物损失率的影响,同时对处理前后热力学特性的变化进行研究,为糙米蒸煮和食品品质的改良提供新思路。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

长粒香糙米、长粒香白米:购于黑龙江五常市,收获年份为 2018 年,储藏于低温、干燥密闭容器。

电子分析天平:梅特勒托利多公司;电热恒温鼓风干燥箱:上海森信实验仪器有限公司;DSC 214 Polyma 差示扫描量热仪:上海力晶科学仪器有限公司;FW-135 型中草药粉碎机:天津泰斯特公司;QGWB-PM001 全谷物低温等离子体专用振动布料器:河北航兴机械科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 糙米单因素实验

将样品放入 0.02 mbar 的旋转真空泵中除去样品表面的水分和气体,对照样品同样需要真空处理。将糙米置于 50 °C 下烘 1、2、3 和 4 h 后建立糙米水分含量梯度。根据前期实验结果,考察辉光强度(0、0.5、1.0、1.5 和 2.0 A)、处理时间(1、2、3、4 和 5 min)、水分含量(6.98%、7.34%、7.41%、8.10%和 9.33%)对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响,每次实验处理 200 g 样品。

1.2.2 低温等离子体正交实验设计

在单因素实验的基础上,确定合适的因素水平,以辉光强度、处理时间、水分含量 3 个因素为考察因素,以蒸煮时间和固形物损失率为考察指标,进行 3 因素 3 水平的正交实验见表 1,确定最佳工艺组合,进一步在最优条件下进行验证实验。

表 1 L₉(3⁴)正交实验因素水平

水平	因素		
	A 电流强度/A	B 处理时间/min	C 水分含量/%
1	1.2	1	9.33
2	1.5	2	8.10
3	1.8	3	7.41

1.2.3 低温等离子体处理对糙米蒸煮特性的影响

蒸煮特性的测定参考王肇慈^[7]的方法。

1.2.3.1 蒸煮时间 使用玻璃板-白芯法进行米

饭蒸煮时间的测定。称取 5 g 样品, 加入到 8 mL 沸水中进行蒸煮。蒸煮时, 每隔 2 min 随机取出 10 粒样品, 放在玻璃板上进行挤压。透明白芯出现的时间为蒸煮时间。

1.2.3.2 固形物损失率 称取 5 g 样品, 加入 50 mL 纯净水, 置于铝盒中, 放在电饭锅中蒸煮制至最适蒸煮时间, 滤出样品, 冷却至室温 (约 25 °C) 后, 将米汤倾入已知质量的铝盒中, 在 105 °C 下干燥至质量恒定, 样品固形物损失率计算公式如式 (1)。

$$S = S_i/W_0 \quad (1)$$

式中: S_i 为米汤中固形物质量, mg; W_0 为原料质量, g。

1.2.4 差示量热扫描测定

将糙米粉和精米粉置于铝盒中, 用配套铝盖密封, 在 4 °C 冰箱内平衡 24 h, 以空白铝盒作为对照, 以 10 °C/min 的加热速率使铝盒温度从 20 °C 上升到 100 °C。记录并计算吸热曲线上的起始糊化温度 (T_0)、峰值温度 (T_p) 和热焓变化 (ΔH) [8]。

1.2.5 数据分析

数据处理使用软件 Excel 2007 和 SPSS 17.0 进行数据分析, 绘图采用 Origin-8.0, 所有实验都重复 3 次, 结果表示为“平均值±标准差”。

2 结果与分析

2.1 低温等离子体技术对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

2.1.1 辉光强度对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

设定处理时间为 1 min, 水分含量为 9.33%, 对糙米进行低温等离子体不同辉光强度的处理, 糙米蒸煮时间和固形物损失率变化结果如图 1 所示。结果表明, 糙米的蒸煮时间随着辉光强度的增加不断减小, 与对照组糙米相比, 经过辉光强度为 2 A 时的低温等离子体技术处理后, 糙米的最佳蒸煮时间减少到 25 min 左右, 这可能是由于低温等离子体处理后糙米表面的刻蚀造成的。低

温等离子体中产生的活性物质和高能带电粒子刻蚀了糙米表面的纤维皮层, 导致糙米表面产生凹陷和裂缝, 使水分更容易渗透到糙米内部, 从而加快了淀粉的糊化, 缩短了蒸煮时间[9]。而随着电流强度的增加, 糙米固形物损失率不断增加。研究表明米汤固形物含量越高, 蒸煮时米饭越黏, 食味品质及口感越好[10], 说明低温等离子体处理对糙米口感的改善有积极作用, 但固形物损失率过高时, 糙米饭的营养物质大量流失, 米饭粘结严重, 影响糙米的食味品质。初步设定低温等离子体处理的适宜辉光强度为 1.5 A。

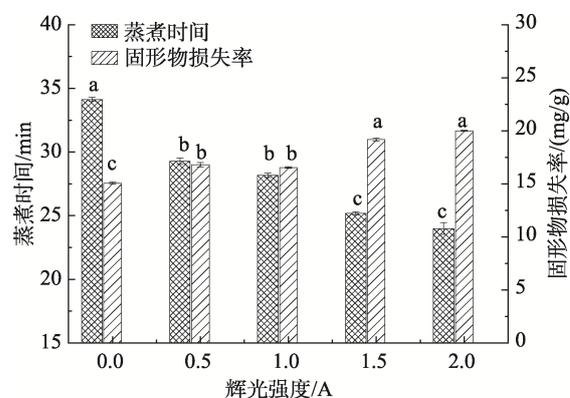


图 1 辉光强度对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

注: 图中 a、b、c 表示同指标标记不同字母者, 差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.1.2 处理时间对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

设定电流强度为 1.5 A, 水分含量为 9.33%, 对糙米进行不同处理时间的低温等离子体技术处理, 蒸煮时间和固形物损失率的变化结果如图 2 所示。糙米粒颗粒由自然状态到完全糊化状态所需要的时间为最佳蒸煮时间。由图 2 可以观察到, 糙米的最佳蒸煮时间随着处理时间的增加呈现先增加后减小的趋势, 当处理时间为 1 min 或 4~5 min 时, 糙米的最佳蒸煮时间最短, 25 min 左右, 比对照组样品 (0 min) 减少了约 8 min 左右, 主要是因为低温等离子体工作时整个空间呈真空状态, 在一定范围内, 真空度越高, 水的沸点越低[11], 糙米经过抽真空操作后表面水分挥发, 水分含量减少, 导致低温等离子体产生的活性物质

与水分子离子化后的粒子反应效应减弱，进一步导致糙米最佳蒸煮时间增加；当处理时间不断增加时，低温等离子体中的高能离子源不断冲击糙米表面，导致糙米表面蚀刻效应严重，亲水性增加^[12]，使得蒸煮时间进一步缩短。固形物损失率随着处理时间的增加逐渐增加，当处理时间为 5 min 时，固形物损失率达到最大，为 44 mg/g。这是因为低温等离子体处理时间增加后，糙米的表面的蚀刻效果增加，米粒内容物流失较多，导致固形物损失率增加。因此，结合固形物损失率和蒸煮时间综合分析，选择低温等离子体适宜处理时间为 1 min。

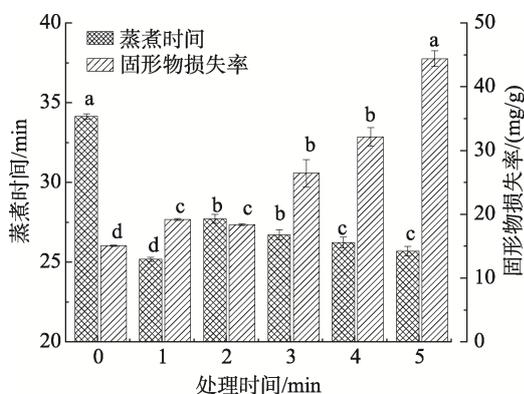


图 2 处理时间对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

2.1.3 水分含量对低温等离子体处理下糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

当电流强度为 1.5 A，处理时间为 1 min 时，糙米的蒸煮时间随着水分含量的增加不断减少，而固形物损失率随着水分含量增加逐渐增加，当水分含量为 9.33% 时，糙米的蒸煮时间最低，此时的固形物损失率为 20% 左右（见图 3）。糙米蒸

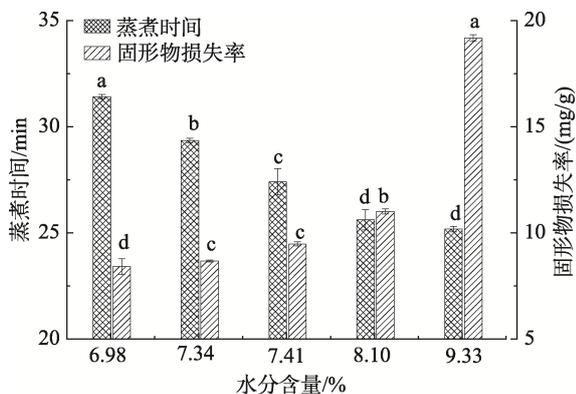


图 3 水分含量对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

煮时间的长短主要取决于低温等离子体产生的刻蚀效应的强弱，水分含量越少，糙米的蚀刻效应越弱，因此蒸煮时间越长；另外，水分被电离产生的粒子可能与糙米淀粉发生交联，影响糙米的蒸煮时间和固形物损失率^[13]。综合来看，当水分含量为 9.33% 时，糙米蒸煮时间最低。

2.2 正交实验结果

2.2.1 正交实验结果分析

由表 2 中的极差结果可以看出，影响糙米蒸煮时间的各因素强弱顺序为：处理时间>电流强度>水分含量，即 B 处理时间对糙米蒸煮时间影响最大，正交实验的最佳组合为 A₃B₂C₁，即：电流强度 1.8 A，处理时间 2 min，水分含量 9.33%。以固形物损失率为指标的最佳处理工艺为 A₃B₂C₂，三因素影响大小顺序为水分含量>处理时间>电流强度。

表 2 正交分析实验方案及结果

实验号	影响因素				蒸煮时间 /min	固形物损失率 / (mg/g)
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	25.55	19.94
2	1	2	2	2	26.37	16.89
3	1	3	3	3	27.24	18.95
4	2	1	2	3	26.03	16.10
5	2	2	3	1	26.25	16.86
6	2	3	1	2	26.72	23.45
7	3	1	3	2	26.46	16.91
8	3	2	1	3	25.31	19.18
9	3	3	2	1	26.56	16.90
时间 K1	78.96	78.04	77.38			
时间 K2	79.6	77.93	78.46			
时间 K3	78.33	80.52	78.18			
时间 R	0.42	1.03	0.36			
固损 K1	55.78	52.95	62.57			
固损 K2	56.41	52.93	49.89			
固损 K3	52.99	59.3	52.72			
固损 R	3.42	6.37	12.68			

2.2.2 验证实验

为了考查实验结果的可靠性，在优化的工艺

参数下进行验证实验。低温等离子体对糙米蒸煮时间的验证实验结果见图 4, 白米 (WR)、糙米 (BR)、低温等离子处理的糙米 (LTP-BR) 的蒸煮时间之间的差异显著 ($P < 0.05$)。相比较于 BR, LTP-BR 的蒸煮时间缩短了 9 min 左右 ($P < 0.05$), 接近于 WR, 根据已有的电饭煲热力学设计, LTP-BR 可以很好地实现与 WR 的共煮同熟。而组合 $A_3B_2C_1$ 的 LTP-BR 的蒸煮时间低于组合 $A_3B_2C_2$, 固形物损失率不存在差异, 因此选用组合 $A_3B_2C_1$ 进行后期实验分析, 即辉光强度 1.8 A、处理时间 2 min、水分含量 9.33%。

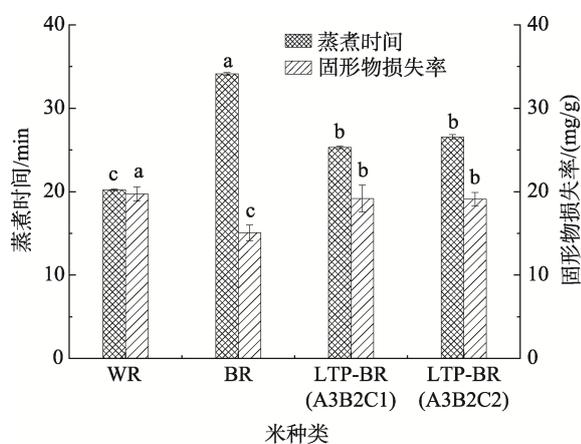


图 4 低温等离子体对糙米蒸煮时间和固形物损失率的影响

2.3 糙米的热力学性质分析

淀粉颗粒在加热过程中遇水迅速膨胀, 导致分子内和分子间的氢键断裂, 淀粉颗粒逐渐扩散的过程称为淀粉的糊化, 这一过程伴随着能量的变化, 在 DSC 图谱中体现为吸热反应^[14]。低温等离子体技术处理前后糙米粉的热力学参数如表 3 所示。由表 3 可以观察到, 经低温等离子体技术处理后糙米样品的糊化起始温度低于未处理糙米和白米样品, 可能是由于等离子体活性粒子导致淀粉颗粒的解聚或者直链淀粉与支链淀粉比例的改变引起温度的降低^[15], 导致其损伤程度更高; LTP-BR 样品的峰值温度略高于 BR, 这是由于等离子体中的活性粒子 (OH) 交联在两个 C-OH 链之间形成新的 C-O-C 键, 分子间结合力增强, 颗粒结构更致密, 导致糙米的峰值温度升高^[16], 与

Wongsagonsup 等^[17]实验结果类似。糙米中的脂类物质主要存在于外种皮中, 白米不含种皮, 脂类物质含量很少, 而稻米中的直链淀粉与脂类结合会影响米粉的糊化^[18], 正好解释了 BR 和 LTP-BR 的糊化温度低于 WR 的原因。Wang 等^[19]研究发现焓值代表着淀粉分子双螺旋结构的丢失, 低温等离子体处理后的糙米焓值为 6.14 kJ/g, 略低于对照组糙米样品, 表明糙米在蒸煮过程中可以消耗更少的能量。

表 3 米粉的热力学性质

处理	起始温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C	焓值/(kJ/g)
WR	60.30±0.85a	69.35±1.20a	77.75±0.49a	5.95±0.98a
BR	60.90±1.84a	69.10±0.14a	76.55±0.07a	6.15±0.33a
LTP-BR	59.50±0.42a	69.20±0.14a	76.00±0.35a	6.13±0.02a

2.4 讨论

低温等离子体技术作为一种新兴的非热食品加工技术, 目前在改善谷物品质方面引起广泛关注。有研究报道, 低温等离子体能够有效的缩短糙米的蒸煮时间, 且随着电压和处理时间的增加糙米的蒸煮时间均呈现先减小后增大的趋势^[4]。研究在前人研究基础上, 进一步分析物料水分在低温等离子体技术作用下对其蒸煮特性的影响, 通过优化后发现经低温等离子体处理后糙米的蒸煮时间明显减少, 缩短至 25 min 左右, 蒸煮时间受处理时间的影响趋势与前人研究结果相似, 而蒸煮时间随着辉光强度和水分含量的增加逐渐减小。不同产区的糙米水分含量会存在一定的差异, 而糙米中的水分在低温等离子体的作用下生成·OH、·O 和·H 等可以和淀粉发生交联, 另一方面羟基自由基可能会与微生物体中的多种成分发生发应^[20], 从而阻碍微生物的正常生长, 有利于糙米的贮藏。由此来看, 低温等离子体技术在糙米行业具有巨大的发展潜力。

3 结论

低温等离子体处理糙米各工艺参数对蒸煮时间和固形物损失率影响显著, 优化参数组合为: 辉光强度 1.8 A, 处理时间 2 min, 水分含量 9.33%,

此时糙米蒸煮时间为 25.3 min, 固形物损失率为 19.18 mg/g, 与验证结果相对误差小于 5%; 但与原始糙米相比, 蒸煮时间缩短了 9 min 左右, 固形物损失率增加了 4 mg/g。

热力学实验表明低温等离子体可以降低糙米的起始温度、终止温度和焓值, 在一定程度上可以减少糙米在糊化过程中的能耗。

参考文献:

- [1] 齐琳琳, 于亮, 于勇. 糙米的营养价值及其加工技术研究进展[J]. 中国食物与营养, 2015, 21(3): 68-71.
- [2] SIRISOONTARALAK P, NAKORNPANOM N N, KOAKIETDUMRONGKUL K, et al. Development of quick cooking germinated brown rice with convenient preparation and containing health benefits[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(1): 138-144
- [3] 孙潇, 张月婷, 张花利, 等. 等离子体在食品杀菌中的研究现状与展望[J]. 保鲜与加工, 2010, 10(6): 46-50.
- [4] CHEN H H, CHEN Y, CHANG C H. Evaluation of physicochemical properties of plasma treated brown rice[J]. Food Chemistry, 2012(135): 74-79
- [5] CHEN H H, LIN S Y, KON W. Application of atmospheric plasma technology to long-grain brown rice modification[J]. International Conference on Food and Nutrition Technology, 2014, 11(72): 51-54.
- [6] THIRUMDAS R, SARAGAPANI C, AJINKYA M T, et al. Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties of brown rice[J]. Innovative Food Science Emerging Technologies, 2016(37): 53-60.
- [7] 王肇慈. 粮油食品品质分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 297-340.
- [8] 于巍, 周坚, 徐群英, 等. 糙米与精米的营养价值与质构特性比较研究[J]. 食品科学, 2010, 31(9): 95-98.
- [9] THIRUMDAS R, KADAM D, Annapure U S. Cold plasma: an alternative technology for the starch modification[J]. Food Biophysics, 2017, 12(1): 129-139.
- [10] 何剑飞, 陈召桂. 不同品种的大米品质评价分析[J]. 福建稻麦科技, 2009, 27(4): 31-33.
- [11] 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [12] THIRUMDAS R, DESHMUKH R R, ANNAPURE U S. Effect of low temperature plasma processing on physicochemical properties and cooking quality of basmati rice[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015(31): 83-90.
- [13] PASHKULEVA I, MARQUES A P, VAZ F, et al. Surface modification of starch based biomaterials by oxygen plasma or UV-irradiation[J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2009(21): 21-32.
- [14] 孙威, 晏梦婷, 李芳, 等. 糙米质构重组米糊化度的快速检测[J]. 粮食与饲料业, 2016(3): 26-30.
- [15] LII C Y, LIAO C D, STOBINSKI L, et al. Effects of hydrogen, oxygen and ammonia low-pressure glow plasma on granular starches[J]. Carbohydrate polymers, 2002, 49(4): 449-456
- [16] 余平, 石彦忠. 淀粉与淀粉制品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 246.
- [17] WONGSAGONSUP R, DEEYAI P, CHAIWAT W, et al. Modification of tapioca starch by non-chemical route using jet atmospheric argon plasma[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 102: 790-798
- [18] SUN Q, HAN Z, WANG L, et al. Physicochemical differences between sorghum starch and sorghum flour modified by heat-moisture treatment[J]. Food Chemistry, 2014, 145(4): 756-764.
- [19] WANG L, XIE B, SHI J, et al. Physicochemical properties and structure of starches from Chinese rice cultivars[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(2): 208-216.
- [20] 杨菊芳, 任雅琳, 陈存社, 等. 低压低温等离子体促进水分蒸发的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(6): 123-125+129. ☞