

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.02.014

李浩, 杨雪莹, 黄群, 等. 基于低场核磁和扫描电镜分析槟榔卤水的水分迁移规律及微观结构[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 97-104.

LI H, YANG X Y, HUANG Q, et al. Studies on water migration and microstructure of areca brine based on low-field nuclear magnetic resonance and scanning electron microscopy[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 97-104.

基于低场核磁和扫描电镜分析槟榔卤水的水分迁移规律及微观结构

李浩¹, 杨雪莹², 黄群¹, 王孝余¹, 曹建华¹, 岳恒², 姚凌云², 冯涛²✉(1. 湖南伍子醉实业集团有限公司, 湖南 湘潭 411200;
2. 上海应用技术大学 香料香精技术与工程学院, 上海 201418)

摘要: 为了解决槟榔卤水在货架期(60 d)内出现返卤、返白等问题, 用低场核磁共振研究两种槟榔卤水(LS1 和 LS2)水分分布与迁移规律, 用扫描电镜分析其微观结构。结果表明: 随着原卤中饴糖占比的增加, 水分逐渐向更紧密的结合水方向迁移。在不同生产阶段, 不同水、饴糖、氢氧化钙配比的槟榔卤水水分迁移规律基本一致: 原卤阶段, 水分以弱结合水形式存在; 成卤阶段, 水分主要以弱结合水形式存在(LS1, 83.12%; LS2, 90.53%); 成品芯内卤水, LS1 主要以强结合水(50.88%)和不易流动水(38.67%)形式存在, LS2 主要以强结合水(82.43%)形式存在。LS1 自由水含量在成卤和成品芯内卤水阶段高于LS2 3倍。此外, 卤水水分状态与卤水结构之间存在密切关系, 结合水占比越高, 卤水结构越稳定。另一方面, LS1 芯内卤水从正常到返卤, 再到返卤返白的过程中, 水分状态由不易流动水向结合水方向迁移, 同时少部分向自由水方向迁移; 而LS2 芯内卤水从正常到返白的过程中, 水分则主要由结合水向自由水方向迁移。揭示了不同槟榔卤水的水分迁移变化规律及其与卤水结构之间的关系, 为改善槟榔卤水的生产工艺和产品质量提供了理论参考。

关键词: 槟榔卤水; 低场核磁共振; 扫描电镜; 水分迁移; 微观结构**中图分类号:** TS205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2025)02-0097-08**网络首发时间:** 2025-03-07 10:57:05**网络首发地址:** <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250306.1726.006>

Studies on Water Migration and Microstructure of Areca Brine Based on Low-Field Nuclear Magnetic Resonance and Scanning Electron Microscopy

LI Hao¹, YANG Xue-ying², HUANG Qun¹, WANG Xiao-yu¹, CAO Jian-hua¹,
YUE Heng², YAO Ling-yun², FENG Tao²✉

(1. Hunan Wuzizui Industrial Group Co., Ltd., Xiangtan, Hunan 411200, China;

2. School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

收稿日期: 2024-08-16; **修回日期:** 2024-09-06; **录用日期:** 2024-09-09**基金项目:** 校企合作项目“槟榔卤水评价与优化解决方案”(WZZ-10)**Supported by:** School-Enterprise Cooperation “Areca Brine Evaluation and Optimization Solution” (No. WZZ-10)**第一作者:** 李浩, 男, 1992年出生, 硕士, 工程师, 研究方向为槟榔加工工艺, E-mail: 454644922@qq.com**通信作者:** 冯涛, 男, 1978年出生, 博士, 教授, 研究方向为食品物性学与食品风味化学, E-mail: fengtao@sit.edu.cn

Abstract: In order to address rehalogenation and whitening in areca brine during shelf life (60 days), the water distribution and migration of different areca brine was investigated using low-field nuclear magnetic resonance. Meanwhile, the microstructure of these brine were analyzed by scanning electron microscopy. The results showed that as the proportion of caramel increased in the original halogen, water gradually migrated towards more tightly bound states. Throughout various production stages, LS1 and LS2 areca brine exhibited the similar water migration rules where water existed in a weakly bound state in the original brine stage. In the finished brine stage, water mainly exists in the form of weakly bound water (LS1, 83.12%; LS2, 90.53%). The brine in the core of areca, LS1 mainly existed in the form of strongly bound water (50.88%) and non-mobile water (38.67%), while LS2 mainly existed in the form of strongly bound water (82.43%). The free water content of LS1 was about 3 times higher than that of LS2 during both the brine forming stage and the finished core brine stage. In addition, there was a significant correlation between the water state of brine and brine structure and a higher proportion of bound water corresponded to a more stable brine structure. Furthermore, during the transformation of LS1 areca brine from normal to rehalogen and subsequently to white, the water state mainly migrated from less mobile water to bound water, with a minor portion migrating towards free water. During the transformation of LS2 areca brine from normal to white, water mainly migrated from bound water to free water. This study revealed the water migration patterns in different areca brines and their relationship with brine structure providing important theoretical reference for improving areca brine production processes and product quality.

Key words: areca brine; LF-NMR; SEM; moisture migration; microstructure

槟榔，棕榈科植物槟榔树的果实，主要种植于东南亚地区、欧洲和太平洋部分地区，在我国，槟榔主产于海南省、台湾省、云南省的河口及西双版纳热带雨林^[1]。槟榔是一种重要的经济作物，经过深加工后，具有独特的口感与提神效果，深受消费者欢迎，全国市场年产值已达数百亿元^[2]。食用槟榔产品由加工去核后的槟榔壳和卤水组成，其中卤水是槟榔具有良好风味的“灵魂”，主要包含饴糖、食品级熟石灰（氢氧化钙）、甜味剂、水及天然香精香料等物质^[3]。卤水质量对槟榔货架期品质问题起决定性作用，但目前绝大多数企业在卤水的制备阶段仍沿用传统的手工操作方式，凭经验判断卤水品质高低，缺乏科学客观的评价标准。因此，因卤水品质导致的货架期不稳定已成为制约食用槟榔行业进一步高速发展的关键因素之一。食用槟榔最易出现的品质问题有返卤、返白以及返卤返白。槟榔返卤主要是指加工后的槟榔在运输和销售过程中芯内的卤水出现浸润感，呈流动性状态；而返白是指加工后槟榔在运输和销售过程中芯内的卤水出现白色或淡黄色点状物，看似霉变。返卤返白是指加工后的槟榔

片在运输和销售过程中芯内的卤水既出现融化，又出现零星式白点或淡黄色点状物^[3]。

根据不同生产阶段的特点，卤水可分为不同的类型：由饴糖和熟石灰经熬制膨化后形成的卤水称为原卤；在原卤基础上添加甜味剂和天然香精等成分后称为成卤；将成卤点到槟榔壳并晾片后称为槟榔成品芯内卤水。卤水水分含量是决定卤水品质的关键因素之一^[3]，因此，深入探究不同生产阶段卤水的水分含量、分布特性及其水分迁移规律对有效控制和提升卤水品质具有重要指导意义。

低场核磁共振（Low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR）能够通过弛豫时间变化分析出水分子迁移变化的规律^[4]，是一种新兴的检测各类物质水分分布与水分迁移的无损检测手段，物质体系中水分子的运动特征通过质子弛豫时间和信号幅值表征^[5]。该技术具有灵敏度高、速度快、无损检测等特点，是分析食品中水分状态和迁移方向的有效手段^[6]。弛豫时间（ T_2 ）与氢质子所受束缚力与自由度有直接关系，弛豫时间越短，表明氢质子所受束缚力越强，水与底物

结合越紧密,弛豫时间越长,则表明水分子自由度越高,流动性越强^[7]。 T_2 的变化可以实时跟踪卤水样品存放过程中水分状态变化情况,能快速、直观地得到水分变化规律^[8]。 T_2 弛豫反演谱的变化范围在 0.01~10 000 ms 之间,依次记为 T_{20} (0.01~1 ms) 强结合水、 T_{21} (1~10 ms) 弱结合水、 T_{22} (10~100 ms) 不易流动水、 T_{23} (>100 ms) 自由水。其中强结合水主要指的是与亲水多糖或增稠剂紧密结合的水^[3];弱结合水主要指的是与钙离子、葡萄糖等单糖结合的水;不易流动水主要指的是结合水与麦芽糖形成的网络内截留的水;自由水主要指的是游离在网络外,且与其他分子间无氢键连接的水。不同状态的水的含量由 T_2 反演图谱上对应峰积分面积大小代表^[9]。目前,该技术被广泛应用于果蔬类食品^[10]、农产品^[11-12]、海产品等领域^[13]。然而,基于 LF-NMR 探究槟榔卤水中水分迁移规律的研究尚未见报道。

因此,本研究以不同生产阶段以及出现不同品质问题的卤水为研究对象,采用 LF-NMR 探究不同卤水的水分状态、水分迁移方向及水分迁移规律,通过扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)分析卤水表面微观结构的变化,以期为槟榔卤水品质的改进和提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

厂家提供两种不同配方卤水 LS1 和 LS2 (卤水主要由麦芽糖、 Ca^+ 、 OH^+ 、水、葡萄糖组成),包括两种卤水的原卤、成卤、成品芯内卤水(正常、返卤、返白、返卤返白样品)、熟石灰、饴糖。6 种不同灰糖比(熟石灰:饴糖)的原卤由实验室自制。

1.2 仪器与设备

中尺寸核磁共振分析成像系统: 纽迈 MesoMR23-060H-I; 扫描电镜: 德国 ZEISS Sigma 300; 卤素水分测定仪: XY-105MW-A。

1.3 实验方法

1.3.1 横向弛豫时间(T_2)的采集与反演

称取 1.00 g 左右的卤水样品放入磁体线圈中,在核磁共振分析应用软件中设置:硬脉冲 90

度脉宽($P1$) 6.6 μs ,硬脉冲 180 度脉宽($P2$) 为 10.64 μs ,重复采样等待时间(TW)为 4 500 ms,回波个数(NECH)为 9 000,重复采样次数(NS)为 16,接受机带宽(SW)为 200 kHz,点击确定按钮采集脉冲信号。最后将所得的测试数据进行 10 000 次反演。所有数据使用归一化法统一质量为 1.00 g。

1.3.2 扫描电镜观察

前处理:原卤和成卤冷冻干燥,槟榔成品在液氮环境中沿芯内卤水中心脆断。将样品置于扫描电镜(SEM)的样品盘,然后将其放入真空蒸发器中镀上金属膜(2~5 次),最终将其放入扫描电镜中放大 3 000 倍进行观察。

1.3.3 水分含量测定

精确称取 1.20 g 卤水样品,使用卤素水分测定仪测定其真实水分含量。

1.4 数据处理

利用纽迈核磁共振图像处理软件对图像进行处理,采用 Origin 2021 软件绘图,采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同灰糖比的原卤水分存在状态与含量变化分析

不同灰糖比制作的槟榔原卤存放 0 d 和 7 d 的 LF-NMR 横向弛豫时间 T_2 如图 1a~1b 所示。6 种不同灰糖比的原卤水分几乎均以弱结合水形式存在,结合水含量达到 97%以上,无自由水,水分状态整体较为稳定。如表 1 所示,随着饴糖占比的增加,原卤弛豫时间减小, T_{21} 所对应的峰向左移,该结果表明随着饴糖占比的上升,原卤内的水分向更紧密的结合水方向迁移。核磁共振 T_2 弛豫谱峰面积与样品中氢质子的数量成正比,因此,各相态水分含量可以由 T_2 弛豫谱中各个对应峰面积来反映,即强结合水含量表示为 A_{20} 、弱结合水含量表示为 A_{21} 、不易流动水含量表示为 A_{22} 、自由水含量表示为 A_{23} ,总水分含量则表示为 A_2 ,则 $A_2=A_{20}+A_{21}+A_{22}+A_{23}$ ^[14]。对比存放 0 d 与 7 d 的原卤水分含量,存放过程中,6 种卤水的总水分含量都有下降,此结果与原卤实际水分含量的变

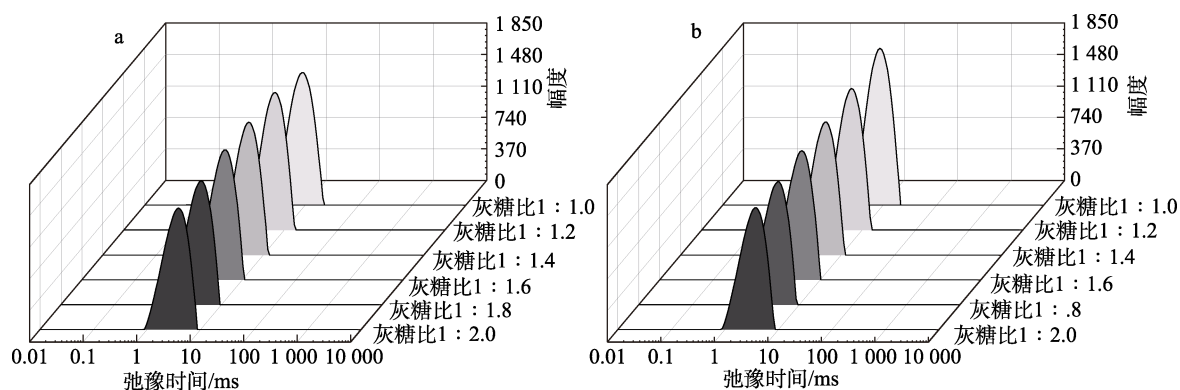
表 1 灰糖比对原卤水分状态和水分含量的影响

Table 1 Effects of the different proportions of hydrated lime and caramel on the state and moisture content of the original brine

原卤 灰糖比	存放 0 d			存放 7 d			7 d 内水分含量减少率/%	
	弛豫时间/ms	总峰面积	实际含水率/%	弛豫时间/ms	总峰面积	实际含水率/%	总峰面积法	真实测定法
	T_{21}	A_2		T_{21}	A_2			
1 : 1.0	8.70±0.15 ^c	61 191.12±0.38 ^b	55.23±0.19 ^a	8.70±0.29 ^d	40 605.23±0.49 ^c	36.05±0.29 ^b	33.64±0.12 ^a	34.72±0.37 ^a
1 : 1.2	6.83±0.37 ^b	67 460.52±0.92 ^c	58.04±0.49 ^b	6.30±0.38 ^c	38 051.51±1.39 ^b	33.54±0.46 ^a	43.59±0.78 ^b	42.21±0.23 ^b
1 : 1.4	5.35±0.23 ^{ab}	54 505.35±1.29 ^a	52.12±0.84 ^a	4.94±0.54 ^b	34 792.66±0.78 ^a	33.91±0.24 ^a	36.17±0.37 ^a	34.94±0.27 ^a
1 : 1.6	4.55±0.48 ^a	61 640.44±0.96 ^b	56.89±0.33 ^{ab}	4.55±0.27 ^b	35 849.54±0.94 ^{ab}	34.08±0.20 ^a	41.84±0.29 ^b	40.09±0.12 ^b
1 : 1.8	4.12±0.39 ^a	56 032.08±1.38 ^a	52.37±0.92 ^a	3.87±0.47 ^a	32 883.85±1.22 ^a	32.04±0.23 ^a	41.31±0.93 ^b	38.82±0.32 ^{ab}
1 : 2.0	3.87±0.28 ^a	62 726.33±0.86 ^b	57.34±0.72 ^b	3.87±0.33 ^a	34 786.32±0.89 ^a	31.98±0.18 ^a	44.54±0.68 ^b	44.23±0.57 ^b

注：不同字母表示在相同时间下的差异显著（ $P<0.05$ ，后同）。

Note: The different letters in the same column indicate significant difference at the same time ($P<0.05$, same as below).



注：a：存放 0 d；b：存放 7 d。

Note: a: stored for 0 days; b: stored for 7 days.

图 1 不同灰糖比原卤的 LF-NMR 图谱

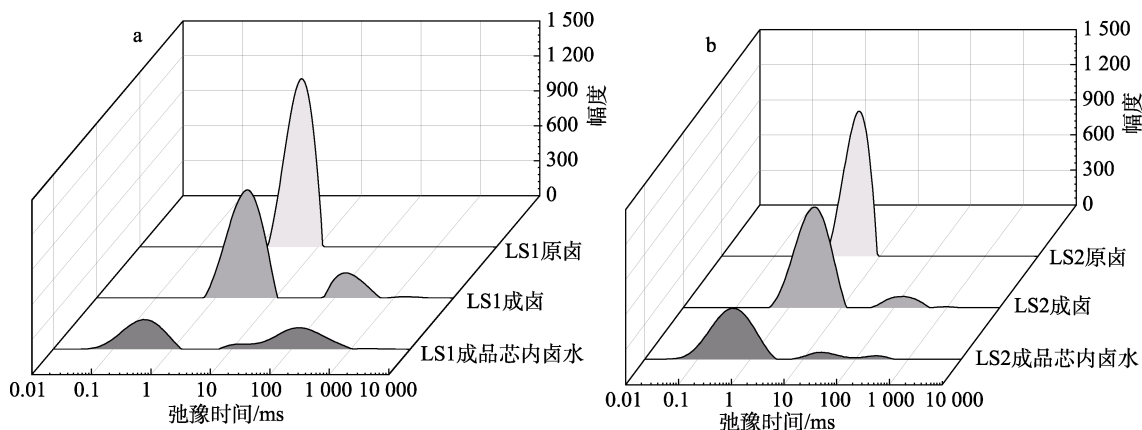
Fig. 1 LF-NMR spectra of the original brine with different proportions of hydrated lime and caramel

化一致。其中灰糖比为 1 : 1.0 的原卤总水分下降率最少，33.64%；灰糖比为 1 : 2.0 时总水分下降率最高，达到 44.54%。总水分减少与自然蒸发有关，也可能与反应后麦芽糖含量与状态有关，卤水在室温 25 ℃存放过程中，未参与反应的麦芽糖之间可能形成多聚体，造成结合水的位点减少，使部分水分从结合态转变为游离态，从而在贮存过程中蒸发散失，而未散失的水分则以结合水的形式存在。

2.2 不同生产阶段和不同品种的槟榔卤水水分存在状态与含量变化分析

不同生产阶段和不同品种槟榔卤水的横向弛豫时间 T_2 如图 2a~2b 所示。LS1 和 LS2 两种槟榔卤水从原卤到成卤，再到槟榔成品芯内卤水的制作过程中，水分状态变化规律基本一致。如表 2 所示，原卤阶段，LS1 和 LS2 水分都以弱结合水形式存在，占比均为 100%。成卤阶段，水分则主

要以结合水形式存在，LS1 和 LS2 占比分别为 83.12%和 90.53%，这表明成卤的水分子与亲水多糖或凝胶物质结合较为紧密，不易流动水和自由水占比相对较少^[3]。槟榔成品芯内卤水阶段，LS1 水分主要以强结合水（50.88%）和不易流动水（38.67%）形式存在，LS2 主要以强结合水（82.43%）形式存在。LS1 自由水含量在成卤和成品芯内卤水阶段高于 LS2 3 倍，分别是：成卤阶段 LS1 14.01%，LS2 5.93%；成品芯内卤水阶段 LS1 10.46%，LS2 2.97%，表明 LS1 卤水水分自由度更大，与非水组分的结合紧密程度低于 LS2。综上表明槟榔卤水从原卤到成卤过程中，部分弱结合水向不易流动水和自由水方向迁移，可能原因是：原卤成分简单，由饴糖和氢氧化钙反应生成，卤水中携带氢键的麦芽糖、葡萄糖、5-甲基糠醛等大分子物质较多，含大量羟基，从而更易键合水分子，因此水分基本都以弱结合水



注：a：LS1 卤水；b：LS2 卤水。

Note: a: LS1 brine; b: LS2 brine.

图 2 不同生产阶段槟榔卤水的 LF-NMR 图谱

Fig. 2 LF-NMR spectra of areca brine at different production stages

表 2 不同生产阶段卤水弛豫时间和水分状态变化

Table 2 Changes of areca brine relaxation time and water state in different production stages

卤水种类	弛豫时间 T_{20}	弛豫时间 T_{21}	弛豫时间 T_{22}	弛豫时间 T_{23}	强结合水 $A_{20}/\%$	弱结合水 $A_{21}/\%$	不易流动水 $A_{22}/\%$	自由水 $A_{23}/\%$
LS1 原卤	—	5.17 ± 0.35^a	—	—	—	100.00 ± 0.00^c	—	—
LS1 成卤	0.93 ± 0.05^a	3.41 ± 0.59^a	98.85 ± 0.73^b	155.22 ± 0.79^b	1.36 ± 0.24^a	81.76 ± 1.38^b	2.87 ± 0.39^a	14.01 ± 0.27^c
LS1 成品芯内卤水	0.32 ± 0.08^a	—	15.70 ± 1.39^a	135.10 ± 1.73^a	50.88 ± 0.83^b	—	38.67 ± 0.94^b	10.46 ± 0.19^{bc}
LS2 原卤	—	4.12 ± 0.56^a	—	—	—	100.00 ± 0.00^c	—	—
LS2 成卤	0.96 ± 0.08^a	3.18 ± 0.98^a	97.49 ± 0.23^b	144.81 ± 0.78^{ab}	2.79 ± 0.38^a	87.74 ± 0.73^b	3.54 ± 0.47^a	5.93 ± 0.68^b
LS2 成品芯内卤水	0.46 ± 0.09^a	2.43 ± 0.24^a	22.22 ± 1.22^a	252.35 ± 1.89^c	82.43 ± 0.48^c	6.38 ± 0.31^a	8.22 ± 0.39^{ab}	2.97 ± 0.32^a

形式存在；成卤中含有部分自由水，是由于成卤中成分复杂，部分水分子饱和或羟基含量减少，导致少量水分游离。

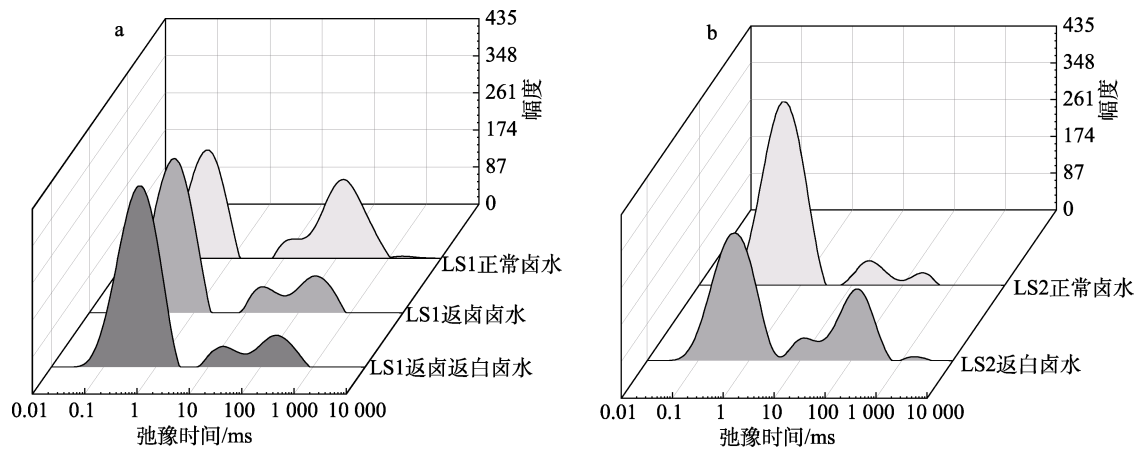
LS1 和 LS2 两种槟榔卤水对比分析，在三个不同阶段，LS2 所含有的结合水含量占比更高，说明其水分与卤水中多糖物质和胶状物质结合更紧密。槟榔产品在 60 d 内实验观察结果为 LS2 槟榔产品更不易返卤，表明卤水的水分状态与卤水的稳定性存在一定联系，卤水中结合水占比越高，可能在运输与贮存过程中其平衡体系越不易被破坏，这也为槟榔返卤问题的解决提供了新思路，但是否还与其他因素相关，还需进一步研究分析。

2.3 不同品质问题的槟榔卤水水分存在状态与含量变化分析

槟榔产品在 60 d 内实验观察结果为 LS1 市售槟榔芯内卤水容易出现先返卤，再返卤返白的问题，LS2 市售槟榔芯内卤水则容易出现返白的问题。不同品质问题的 LS1 槟榔卤水的横向弛豫时

间 T_2 如图 3a 所示。LS1 槟榔芯内卤水从正常到返卤过程中，水分状态主要由不易流动水向结合水方向迁移，少部分水向自由水方向迁移。推测原因可能是卤水在生产工艺当中添加有水、麦芽糖和食用植物油，是一个少油多水的混合体系，而且在制作过程进行了高速搅拌和原料的快速反应，因此可将卤水看做以水包油为主的微乳体系，返卤过程中自由度较高的水分会向更稳定的结合水方向迁移，致使部分水油呈分离相，部分油析出，产生返卤现象。从返卤到返卤返白过程，卤水水分继续由不易流动水向结合水方向迁移，部分自由水与二氧化碳、钙离子结合生成碳酸钙从而导致返白的产生^[15]。

LS2 槟榔芯内卤水从正常到返白过程中，无返卤现象发生，水分状态主要由结合水向自由水方向迁移，其中部分自由水与二氧化碳、钙离子结合生成碳酸钙，导致返白。此外，据表 3 所示，卤水从正常到返卤，再到返卤返白过程中，总含水量呈逐渐下降的趋势，这与李良怡^[3]的研究结



注：a：LS1 卤水；b：LS2 卤水。
Note: a: LS1 brine; b: LS2 brine.

图 3 不同品质问题的成品槟榔芯内卤水 LF-NMR 图谱
Fig.3 LF-NMR spectra of the finished areca core brine with different quality problems

表 3 不同品质问题的槟榔卤水水分状态
Table 3 Areca brine moisture states with different quality problems

卤水种类	结合水 $A_{20-21}/\%$	不易流动水 $A_{22}/\%$	自由水 $A_{23}/\%$	总峰积分面积 A_2	真实含水率 $\%$
LS1 正常卤水	50.87 ± 0.83^a	38.67 ± 0.94^b	10.46 ± 0.19^b	$10\,235.89\pm0.12^b$	16.87 ± 0.03^a
LS1 返卤卤水	75.58 ± 0.34^b	8.75 ± 0.06^a	15.67 ± 0.36^b	$9\,544.35\pm0.29^b$	15.24 ± 0.12^a
LS1 返卤返白卤水	81.57 ± 0.79^b	6.36 ± 0.28^a	12.07 ± 0.44^b	$9\,320.92\pm0.23^b$	14.78 ± 0.23^a
LS2 正常卤水	88.81 ± 0.48^{bc}	8.22 ± 0.39^a	2.97 ± 0.32^a	$9\,820.35\pm0.17a$	15.72 ± 0.04^a
LS2 返白卤水	63.50 ± 0.28^{ab}	6.12 ± 0.18^a	30.38 ± 0.73^c	$8\,623.29\pm0.36^a$	13.76 ± 0.07^a

果一致，此外该趋势也与真实含水率变化一致，再次证明 LF-NMR 技术手段的有效性。对比 LS1 与 LS2 正常芯内卤水，发现 LS1 芯内卤水的自由水占比远高于 LS2 芯内卤水 (LS1, 10.46%; LS2, 2.97%)，而 LS1 芯内卤水易返卤，LS2 芯内卤水几乎无返卤现象产生，表明槟榔芯内卤水在货架期是否易发生返卤与芯内卤水的水分状态有一定关系，在一定范围内，芯内卤水的自由水含量占比越高，卤水稳定性越差；当槟榔成品芯内卤水中自由水含量占比大于 10% 时，槟榔产品在贮藏及运输过程中易受温度或外力因素影响引发卤水体系失衡，导致水分分布不均，较易产生返卤返白的品质问题。

2.4 不同槟榔卤水的微观结构

采用 SEM 对槟榔原卤表面进行观察，如图 4 所示。灰糖比 1 : 1.0 与 1 : 1.2 的原卤，存放 0 d 和 7 d 的结构差异较大，其余灰糖比的卤水表面结构变化不大。存放 0 d 时，两种原卤的表面较为平整，有部分凸起；存放 7 d 时，灰糖比 1 : 1.0 的原卤表面呈现球状小体聚合，灰糖比 1 : 1.2 的

原卤表面呈规则梯形凸起。结果表明原卤中饴糖占比较少时，在存放过程中结构不稳定，易发生变化，而灰糖比大于 1 : 1.4 的原卤在存放前后结构较稳定，不易发生变化。这一结果与宏观现象一致，灰糖比 1 : 1.0 与 1 : 1.2 的原卤，在存放 7 d 后，出现明显的分层现象，其他比例的原卤则无此现象。由表 1 可知，在 6 个不同的灰糖比下，存放 7 d 的原卤比存放 0 d 的原卤都失去了 33.64%~44.54% 的水分，从图 4 可以看出，相同灰糖比存放 7 d 的原卤与存放 0 d 的相比，其表面结构均较为粗糙，说明水分迁移影响了原卤的表观形貌。

不同生产阶段的卤水结构影响其内部水分状态迁移变化，对原卤、成卤表面以及槟榔成品芯内卤水横截面进行结构观察，如图 5 所示。原卤阶段，两种卤水均呈现较规则的蜂窝状排列。成卤阶段，两种卤水的蜂窝状结构明显塌陷消失，孔状结构严重变形，出现明显的颗粒。成品阶段，两种卤水表面较平整，LS2 卤水的平整度优于 LS1 卤水，卤水表面呈现多个圆形孔状凹陷。以上结

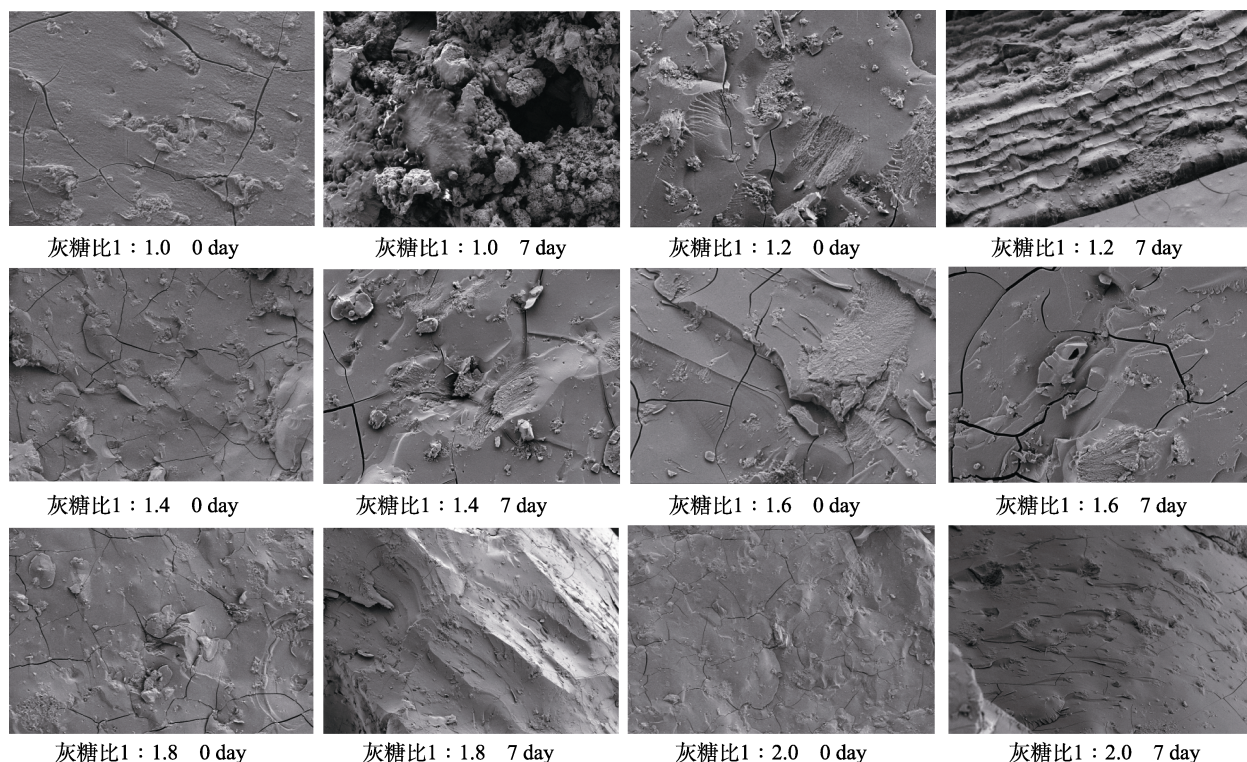


图 4 存放 0 d 和 7 d 的不同灰糖比卤水的微观结构

Fig. 4 Microstructure of the original brine with different proportions of hydrated lime and caramel stored for 0 or 7 days

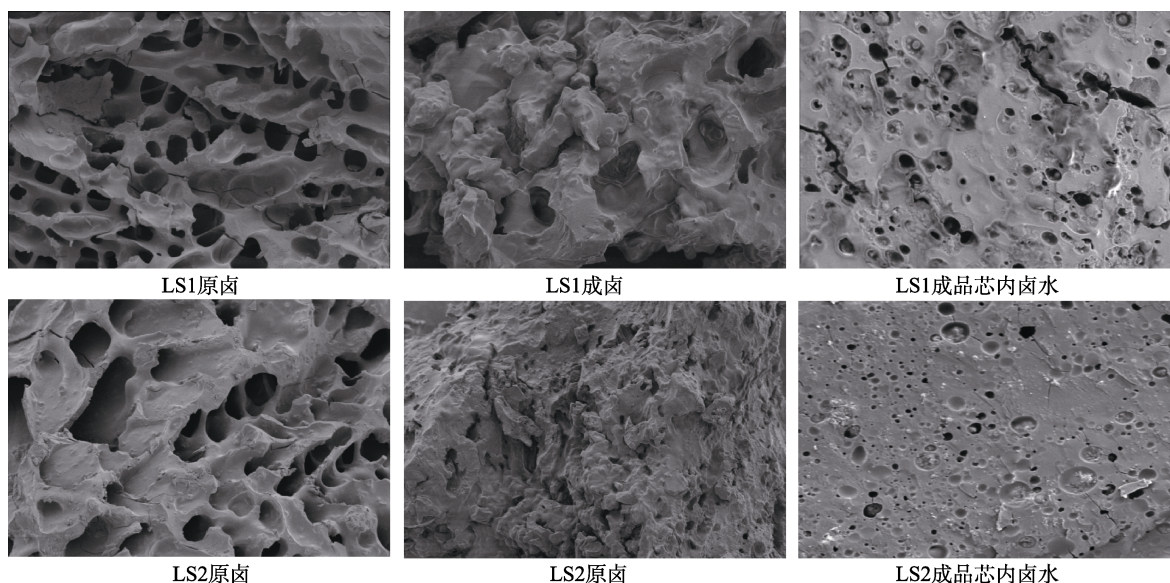


图 5 不同生产阶段的槟榔卤水微观结构

Fig. 5 Microstructure of areca brine at different production stages

果表明原卤阶段的结构比成卤阶段更稳定, LS2 成品芯内卤水比 LS1 成品芯内卤水的结构状态更稳定。上述结果与 LF-NMR 结果一致, 进一步验证了卤水水分状态与卤水结构之间存在密切关系, 结合水占比越高, 卤水结构越稳定。

3 结论

本研究通过 LF-NMR 和 SEM 分析了不同槟

榔卤水的水分迁移变化规律及其微观结构状态, 结果表明: LS1 槟榔原卤和 LS2 槟榔原卤水分均以弱结合水形式存在; 从原卤阶段到成卤阶段, 部分弱结合水向自由水和不易流动水方向迁移; 从成卤阶段到成品槟榔芯内卤水阶段, 水分主要由弱结合水向强结合水方向迁移。卤水的水分分布与卤水结构之间有密切关系, 结合水含量占比越高, 卤水结构越稳定。另外, 具有不同品质问

题的成品槟榔芯内卤水的水分分布也有一定差异。综上所述, LF-NMR 结合 SEM 可以有效地确定槟榔卤水在不同生产阶段以及品质变化过程中水分状态的变化, 研究成果对于进一步改善卤水品质, 减少货架期返卤和返白现象的发生提供了理论基础。

参考文献:

- [1] BUENTE W, DALISAY F, POKHREL P, et al. An Instagram based study to understand Betel nut use culture in micronesia: Exploratory content analysis[J]. *Journal of Medical Internet Research*, 2020, 22(7): e13954.
- [2] YOU Y H, HUANG Y, WANG D, et al. Angiotensin (1-7) inhibits arecoline-induced migration and collagen synthesis in human oral myofibroblasts via inhibiting NLRP3 inflammasome activation[J]. *Cell Physiol*, 2019, 234: 4668-4680.
- [3] 李良怡. 食用槟榔卤水货架期内品质变化特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- LI L Y. Study on quality variation characteristics of edible betelnut brine during shelf life[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022.
- [4] 卫志娇, 朱文学, 白喜婷, 等. 基于低场核磁和电镜扫描法对热风干燥花生仁的水分状态研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(11): 213-220.
- WEI Z J, ZHU W X, BAI X T, et al. Study on moisture state of peanut kernel dried by hot air based on low field NMR and SEM[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(11): 213-220.
- [5] KAI F, MIN Z. Recent developments in the food quality detected by non-invasive nuclear magnetic resonance technology[J]. *Crit Rev Food Sci*, 2019, 59(14): 2002-2013.
- [6] CHENG S S, LI R R, YANG H M, et al. Water status and distribution in shiitake mushroom and the effects of drying on water dynamics assessed by LF-NMR and MRI[J]. *Drying Technology*, 2020, 38 (8): 1001-1010.
- [7] CHENG S, WANG X, LI R, et al. Influence of multiple freeze-thaw cycles on quality characteristics of beef semimembranous muscle: With emphasis on water status and distribution by LF-NMR and MRI[J]. *Meat Sci*, 2019, 147: 44-52.
- [8] 时文六, 胡乔乔, 冯裕杰, 等. 基于核磁共振及成像技术研究速冻汤圆在冻融过程中的水分迁移变化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(21): 20-27.
- SHI W L, HU Q Q, FENG Y J, et al. Water migration of fast-frozen glutinous rice dumplings during freeze-thaw process based on nuclear magnetic resonance and imaging techniques[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(21): 20-27.
- [9] 王永瑞, 薛美芳, 罗瑞明, 等. 羊肉烤制过程中水分的分布与迁移规律[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(3): 297-308.
- WANG Y R, XUE M F, LUO R M, et al. Moisture distribution and migration law of mutton during the roasting process[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(3): 297-308.
- [10] YI Y, YANG K, ZENG S, et al. Super-resolution reconstruction of LF NMR image based on DDPM for fruit nondestructive testing[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 131: 106219.
- [11] YOUNAS S, MAO Y, LIU C, et al. Measurement of water fractions in freeze-dried shiitake mushroom by means of multispectral imaging (MSI) and low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 96: 103694.
- [12] YANG J, ERASMUS S W, SUN Q, et al. Exploring the dynamic water mobility and distribution in model systems of wheat noodles with different gluten-to-starch ratios based on LF-NMR[J]. *Journal of Cereal Science*, 2024, 116: 103855.
- [13] LIU S, ZHANG L, LI Z, et al. Effect of temperature fluctuation on the freshness, water migration and quality of cold-storage *Panax ginseng* [J]. *LWT*, 2024, 193: 115771.
- [14] 陈毅, 顾莹, 宋平, 等. 利用低场核磁共振分析蓝莓贮藏过程中水分含量及迁移变化[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(17): 321-328.
- CHEN Y, GU Y, SONG P, et al. Analysis of the moisture content and migration changes of blueberries during storage by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(17): 321-328.
- [15] 陈祁衡, 简小鹏, 陈胜, 等. 食用槟榔卤水返白及抑制技术研究[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(11): 83-88.
- CHEN Q H, JIAN X P, CHEN S, et al. Study on edible areca nut brine whitening and its inhibition[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(11): 83-88. 图
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。