

基于低场核磁共振技术的不同干燥过程中光皮木瓜水分迁移规律研究

陈衍男^{1,2}, 赵恒强¹, 卢 丙³, 王 晓¹, 崔 莉^{1*}, 郭兰萍¹

1. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省分析测试中心, 山东省中药质量控制技术重点实验室, 山东 济南 250014

2. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018

3. 苏州纽迈分析仪器有限公司, 江苏 苏州 215163

摘要: **目的** 研究不同干燥过程中光皮木瓜水分迁移变化规律。**方法** 利用低场核磁共振(LF-NMR)技术无损、非侵入的技术优势, 监测不同干燥方式(热风干燥、蒸制后干燥、分段式干燥、阴干)下光皮木瓜的横向弛豫时间(T_2)反演谱, 分析水分迁移变化。**结果** 新鲜光皮木瓜片中含有3种状态的水, 其含量为自由水>结合水>不易流动水, 热风干燥、蒸制后干燥、阴干的规律相似, 总水分逐渐散失, 水分与非水组分的结合力会增强, 蒸制加快了木瓜片的失水率, 蒸制后干燥与热风干燥下木瓜片失水速率有显著性差异($P<0.05$)。分段式烘干中, 干燥的间歇阶段会发生不同状态水分之间的转换, 以重新达到相对稳定的平衡状态。低温干燥对木瓜组织破坏较小, 更利于组织中不易流动水转化为自由水, 进而较快散失, 而高温干燥在前期就对木瓜片组织结构造成破坏, 组织收缩变形, 水分与非水组织间的结合力出现短暂增强的现象。**结论** 光皮木瓜干燥过程中3种状态的水分含量与LF-NMR T_2 谱的峰面积有较高的相关性, LF-NMR技术为光皮木瓜中水分分布及变化规律研究提供了直观的参考依据, 为木瓜的加工开发提供理论基础。

关键词: 光皮木瓜; 水分; 干燥; 低场核磁共振技术; 横向弛豫时间

中图分类号: R283.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2018)17-4022-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2018.17.009

Analysis on moisture transfer laws of *Chaenomeles sinensis* during drying process based on low-field NMR

CHEN Yan-nan^{1,2}, ZHAO Heng-qiang¹, LU Bing³, WANG Xiao¹, Cui Li¹, Guo Lan-ping¹

1. Key Laboratory of TCM Quality Control Technology, Shandong Analysis and Test Center, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China

2. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

3. Suzhou Niumag Co., Ltd., Suzhou 215163, China

Abstract: Objective To study the moisture transfer laws of *Chaenomeles sinensis* in different drying processes. **Methods** Using the non-destructive and non-invasive technique of low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR), the transverse relaxation time (T_2) inversion spectrum of *C. sinensis* slice was monitored under different drying methods (hot air drying, drying after evaporation, segmental drying and drying in the shade) to analyze the changes of moisture migration. **Results** There were three different types water that were detected in *C. sinensis* (free water > bound water > immobilized water). The internal water distribution and water content changed during drying process. The moisture changes were similar in hot air drying, drying after steaming, and drying in shade, the total water gradually decreased, and the combining degree between moisture and non-water components enhanced. Steaming promoted the water loss rate of *C. sinensis* slice, the water loss rate was higher in drying after steaming than in hot air drying, and the difference was significant ($P<0.05$). During the intermittent drying, the conversion of different states of water would occur in order to return to a relatively stable equilibrium. During the low temperature drying process, immobilized water content decreased and free water content increased. The low-temperature drying has less damage to the tissue, which is more conducive to the conversion of immobilized water into free water, and thus the water dissipated faster. During the early of drying, high temperature caused tissue

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-21); 山东省科学院先导专项; 山东省泰山学者岗位专家支持项目

作者简介: 陈衍男(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为功能食品。E-mail: 1006359577@163.com

*通信作者 崔 莉(1983—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向为中药材采后加工。E-mail: cuili0617@163.com

structure damage, the bonding force between water and non-aqueous tissue would be strengthened because of the tissue shrinkage.

Conclusion The three different types water content and peak area in T_2 was positively correlated. The LF-NMR technique would provide useful guides for the investigation of water distribution and variation of *C. sinensis*, which will provide a theoretical basis for *C. sinensis* processing.

Key words: *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne; moisture; drying; low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR); transverse relaxation time

光皮木瓜 *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne 又名榲桲、木李、海棠、土木瓜,为蔷薇科木瓜属植物木瓜的干燥成熟果实^[1],因果皮干燥后光滑不皱缩而有光皮之称^[2]。光皮木瓜中含有机酸类、三萜类、黄酮类等成分,具有平肝舒筋、和胃化湿之功效,可治疗风湿痹痛、咳嗽痰多、泄泻、痢疾等^[3-7],是我国重要的药食两用资源^[8]。新鲜光皮木瓜含水量高达 80% 左右,极易腐败变质,因而干燥是光皮木瓜采后重要的加工过程,目前对于光皮木瓜干燥过程的研究主要集中在活性成分的变化等^[9-11],内部水分状态及分布变化等研究未见报道,相关研究有利于揭示光皮木瓜干燥过程中的水分散失规律,对光皮木瓜采后加工及综合开发利用等具有重要意义。

低场核磁共振 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 是近年来新兴的一门检测技术,通过检测样品中氢原子核在磁场中的弛豫特性来获得样品水分信息,横向弛豫时间 (T_2) 的变化可从微观角度解释样品内部水分的分布状态及变化规律,具有无损、快速、准确等优点^[12-15],目前该技术在食品贮藏、加工及掺假检测等方面已经有了广泛的应用,取得了很好的效果^[16-20]。本研究利用 LF-NMR 技术研究了不同干燥方式下光皮木瓜片水分状态变化及散失规律,分析了不同温度热风干燥方式下水分状态变化及蒸制对失水率的影响,拟为指导光皮木瓜生产提供理论依据和技术支持。

1 材料与仪器

光皮木瓜于 2017 年 9 月采自山东临沂,经山东中医药大学李佳教授鉴定为木瓜属植物光皮木瓜 *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne 的果实,成熟度为 80%~90%,选择大小均匀、无机械伤、无病虫害的样品。

BAS124S 型万分之一天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; HF-881-2 型热风循环干燥箱,吴江华飞电热设备有限公司; MesoMR23-040V-1 核磁共振成像分析仪,苏州纽迈分析仪器有限公司,磁体强度 0.55 T,磁体温度 32 ℃。

2 方法

2.1 样品处理

将光皮木瓜切成大小均匀的扇形薄片,每片厚约 6 mm,采用不同干燥方式对其进行干燥。

2.1.1 热风干燥 将光皮木瓜片放入烘箱中分别在不同温度条件下进行干燥处理:低温 (35 ℃)、中温 (55 ℃)、高温 (75 ℃),在低、中温干燥过程中,每隔 1 h 进行取样,在高温干燥过程中,每隔 20 min 进行取样,待样品温度降至室温后,进行 LF-NMR 的测定,直至干燥样品至恒定质量。

2.1.2 蒸制后热风干燥 将光皮木瓜片隔水蒸制 20 min 后进行 55 ℃ 热风干燥实验,每隔 1 h 进行取样,进行 LF-NMR 的测定,直至干燥样品至恒定质量。

2.1.3 分段式热风干燥 将光皮木瓜片置于烘箱中进行热风干燥,设置温度为 55 ℃,干燥 1 h,取出样品置密封袋中密封 10 h,重复实验步骤直至样品恒定质量。

2.1.4 自然阴干 将样品放在通风阴凉处,室温下自然干燥,每 12 小时测 1 次,至样品恒定质量。

2.2 水分含量的测定

按照国家标准 GB-5009.3-2016^[21],采用直接干燥法测定。

2.3 LF-NMR 技术检测

将光皮木瓜样品称定质量后置于 40 mm 线圈中央进行低场核磁试验,用 FID 序列获得样品中心频率,再利用 CPMG 脉冲序列测定样品 T_2 ,连续测量 3 次,取平均值,然后利用 sirt 算法,迭代次数为十万次进行反演得到 T_2 谱图。 T_2 试验主要参数:主频 SF=20 MHz,偏移频率 O1=994 kHz,90 度脉冲时间 P1=7.52 μ s,180 度脉冲时间 P2=17.52 μ s,累加采样次数 NS=4,回波时间 TE=0.350 ms,回波个数 NECH=18 000,信号接收带宽 SW=100 kHz。

2.4 数据处理及分析

利用 T-invfit 软件得到光皮木瓜片反演图谱;使用 Excel 2007 软件进行数据处理,应用 SPSS 17.0

软件进行单因素方差分析(ANOVA)和邓肯多重比较差异性分析,用 Origin 9.0 软件作图。

3 结果与分析

3.1 不同干燥方式下光皮木瓜的 LF-NMR 图谱

将光皮木瓜不同干燥方式下核磁信号数据经过多指数拟合得到 T_2 反演图谱,如图 1 所示,反演图谱中有 3 个峰,从左到右依次为 T_{21} (0.1~10 ms)、 T_{22} (10~100 ms)、 T_{23} (100~1 000 ms),分别表

示结合水、不易流动水和自由水,峰面积表示 3 种状态水的相对含量^[22]。随着干燥时间的增加, T_2 及各个峰的面积都会有变化。 T_2 的大小反映了样品中水分自由度的大小, T_2 越大,水分自由度越高; T_2 越小,水分与其他非水组分的结合越紧密,水分自由度越小^[23]。从图 1 中可以看出,在不同方式的干燥过程中,水分变化呈现出相似的趋势,一是峰面积逐渐减小,二是峰逐渐左移,即自由水含量不断

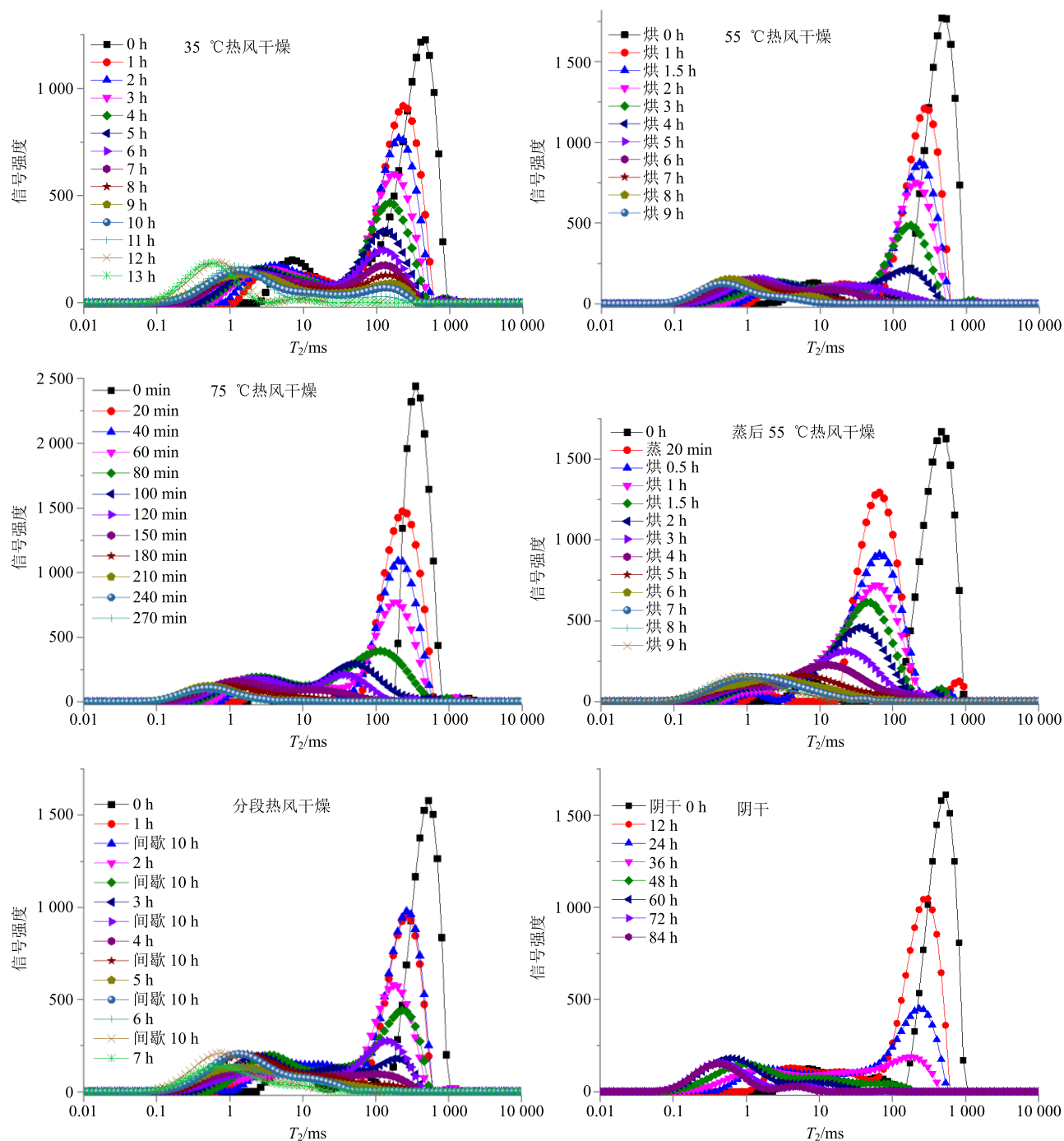


图 1 不同干燥方式下光皮木瓜的 T_2 反演图谱

Fig. 1 T_2 inversion spectrum of *C. sinensis* slice in different drying processes

减少,同时水分与非水组分的结合程度越来越紧密,在干燥的前期过程中主要散失的是自由水。本研究将分别比较不同温度下热风干燥过程中水分变化及不同干燥方式间水分变化的不同。

3.2 不同干燥方式下光皮木瓜核磁信号幅度变化

峰面积的大小可以表征含水量的多少,从表 1 (A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 分别为峰 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 的峰面积, $A_{总}$ 为 3 个峰的总峰面积)可以看出,随着干燥时间的增加,热风干燥、蒸制后热风干燥、阴干过程中总峰面积均逐渐减小,含水量不断降低。对比热风干燥与蒸制后热风干燥,蒸制 20 min 后,结合水、不易流动水、自由水的含量由 6.5%、1.6%、91.9%变为 2.1%、94.9%、3.0%,可见蒸制对水分状态的变化起显著作用,蒸制破坏了光皮木瓜内组织结构,使结合水向不易流动水转化,即水分的结合程度减弱,同时自由水含量显著降低。在蒸后烘干 1.5 h 后,结合水、自由水含量分别增加了 66.4%、40.9%,而不易流动水含量有所降低,推测原因可能是干燥

收缩使不易流动水与大分子结合更加紧密,使部分不易流动水向结合水转移,而光皮木瓜片表皮结构发生破坏使部分不易流动水束缚力作用减小,使部分不易流动水向自由水转化。在热风干燥 4 h 后,不易流动水含量增加了 47%,自由水全部消失。在热风干燥 7 h 后,不易流动水含量极低,光皮木瓜片中大部分为结合水,流动性低,在整个热风干燥过程中,自由水含量呈下降趋势,与总含水量趋势相同。在阴干过程中,自由水在 24 h 后全部消失,此时不易流动水含量显著增加。之后不易流动水一部分向结合水转移,一部分蒸发散失,含量逐渐降低,结合水呈现出先增大后减小的趋势。

在分段式干燥过程中,自由水逐渐减少,在干燥 2 h 后自由水含量显著降低,干燥 3 h 后基本完全散失,光皮木瓜片中水分流动性变差,与其他热风干燥过程中规律一致。不易流动水先增加后减少,推测在干燥初期存在温度梯度,使低熵、低序状态的水向高能级、有序状态的水移动,不易流动水含

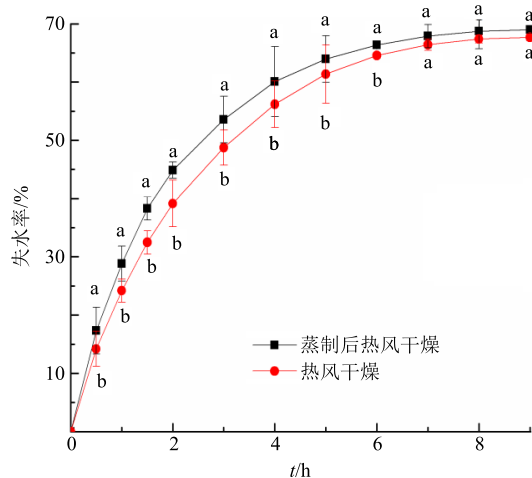
表 1 不同干燥方式下光皮木瓜片 T_2 反演图谱中各峰峰面积变化
Table 1 Changes of peak area of *C. sinensis* slice under different drying modes

干燥方式	时间	A_{21}	A_{22}	A_{23}	$A_{总}$	干燥方式	时间	A_{21}	A_{22}	A_{23}	$A_{总}$
55 °C 热风干燥	0 h	1 193.42	418.07	13 808.90	15 420.39	分段式热风干燥	9 h	2 906.62	9.75	—	2 916.37
	1 h	1 237.97	1 326.28	10 891.29	13 455.54		0 h	1 445.07	748.37	11 973.18	14 166.62
	1.5 h	1 603.47	930.29	8 575.40	11 109.16		1 h	1 468.15	946.38	8 625.01	11 039.54
	2 h	1 704.93	1 113.68	7 567.90	10 386.51		间歇 10 h	2 052.99	1 229.74	9 318.32	12 601.05
	3 h	2 169.75	880.94	5 360.70	8 411.39		2 h	2 471.01	5 953.38	58.95	8 483.34
	4 h	2 569.29	3 473.17	—	6 042.46		间歇 10 h	2 984.93	6 050.32	—	9 035.25
	5 h	2 531.90	2 277.10	—	4 809.00		3 h	2 531.00	3 626.63	18.50	6 176.14
	6 h	2 745.37	1 243.50	—	3 988.87		间歇 10 h	3 062.43	3 301.88	—	6 364.31
	7 h	3 124.80	11.70	—	3 136.50		4 h	2 716.00	1 912.68	—	4 628.68
	8 h	2 742.56	19.69	—	2 762.25		间歇 10 h	2 864.57	1 723.38	—	4 587.95
蒸制后热风干燥	0 min	1 015.95	249.06	14 399.10	15 664.11	间歇 10 h	5 h	3 342.68	356.72	—	3 699.40
	蒸 20 min	307.77	13 624.21	426.77	14 358.75		间歇 10 h	4 229.36	21.24	—	4 250.60
	0.5 h	332.71	13 604.91	169.78	14 107.40		6 h	3 327.19	9.01	—	3 336.20
	1.5 h	989.45	10 028.10	287.27	11 304.82		间歇 10 h	3 615.56	16.50	—	3 632.06
	2 h	1 056.32	8 943.27	172.75	10 172.34	阴干	0 h	1 325.14	568.45	12 443.89	14 337.48
	3 h	1 173.74	6 109.14	78.05	7 360.93		12 h	1 630.04	1 029.43	9 789.45	12 448.92
	4 h	1 134.78	4 824.97	—	5 959.75		24 h	2 270.46	5 931.56	—	8 202.02
	5 h	2 132.56	2 457.65	—	4 590.21		36 h	2 167.65	3 633.11	—	5 800.76
	6 h	3 839.81	45.83	—	3 885.64		48 h	2 617.95	1 293.77	—	3 911.72
	7 h	3 536.37	57.62	—	3 593.99		60 h	2 935.48	538.62	—	3 474.10
	8 h	3 049.68	12.56	—	3 062.24		72 h	2 257.91	235.92	—	2 493.83
							84 h	1 903.89	216.47	—	2 120.36

量增加。在光皮木瓜片干燥间隙, 停止烘干的过程中, 可以发现总峰面积有所增加, 推测可能是光皮木瓜片吸收周围空气中的水分, 这有待进一步实验验证, 同时结合水含量也增加, 可能在干燥过程中, 在高温胁迫的作用下, 木瓜组织受损, 细胞中的水分与非水组分间的结合力不断减弱, 水分呈现逐渐向外扩散的趋势: 结合水-自由水-蒸发散失, 而在停止干燥的间歇阶段, 组织对水分的结合力逐渐恢复, 会发生不同状态水分之间的转换, 以重新达到相对稳定的平衡状态。

3.3 蒸制对光皮木瓜片失水率的影响

蒸制是光皮木瓜采后加工过程中的重要环节, 因光皮木瓜质地坚硬, 水分不易渗入, 故需要采用润透或蒸透法进行软化^[24], 以利于加工处理。由表1可以看出, 光皮木瓜片蒸制后各水分状态发生明显变化, 蒸制后光皮木瓜片中主要为不易流动水, 而未蒸光皮木瓜片中大部分为自由水。在此基础上比较了蒸制后热风干燥与直接热风干燥对光皮木瓜片干燥失水率的影响(图2), 在55℃热风干燥条件下, 蒸制后热风干燥失水率高于直接热风干燥, 经方差分析, 在整个干燥过程中, 2种方式失水率存在显著性差异($P<0.05$)。光皮木瓜片失水率逐渐增加, 在干燥前3h, 光皮木瓜片失水率变化较快, 第3小时时蒸制后干燥失水率达53.6%, 而未蒸制干燥失水率为48.7%, 两者差值最大。蒸制后光皮



a、b 表示 2 种干燥方式之间的方差分析, 不同字母表示在 0.05 水平上有显著性差异 ($P<0.05$)

a, b express analysis of variance between the two drying methods, the letter difference indicates significant differences ($P<0.05$)

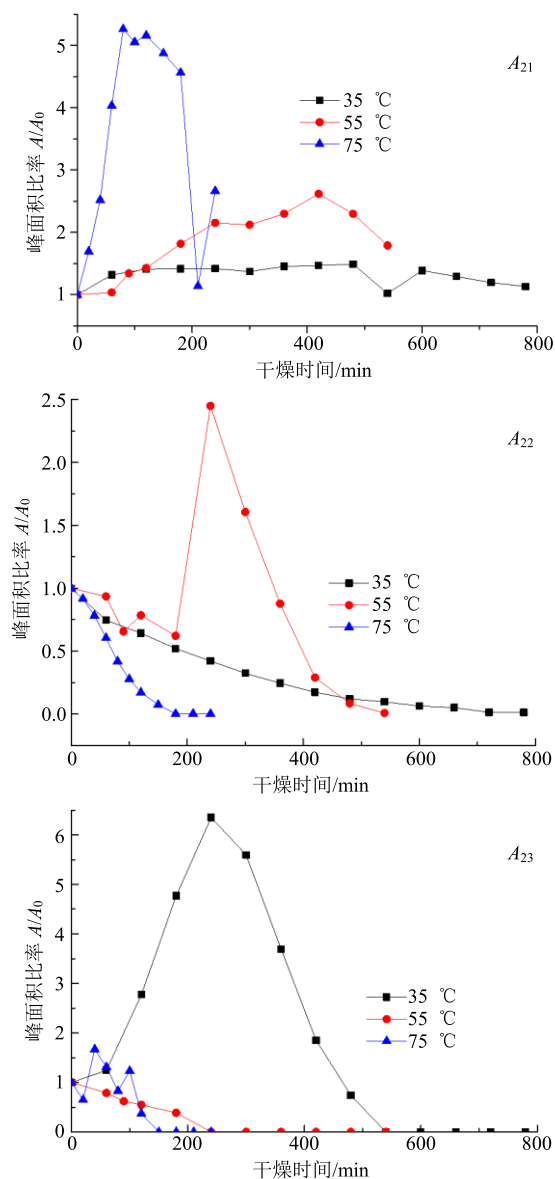
图2 蒸制对光皮木瓜片失水率的影响

Fig. 2 Effects of steaming on water loss rate of *C. sinensis* slice

木瓜片组织结构发生变化, 内部水更易于向表层扩散, 加快了失水速率, 随着干燥的进行, 水分自由度降低, 在干燥后期, 光皮木瓜片失水速率不再增加。同时蒸制会使部分化学成分发生变化, 并会影响光皮木瓜的外观品质, 因而蒸制过程对光皮木瓜干燥品质的影响需综合考虑。

3.4 不同温度热风干燥过程中水分变化规律

热风干燥过程中, 温度是影响干燥失水的重要因素, 图3为光皮木瓜片在不同温度热风干燥过程中3种状态水分的变化规律。从图3可以看出, 75℃



A 为不同时间点的峰面积, A_0 为 0 h 时的峰面积

A is the peak area at different points in time A_0 is the peak area at 0 h

图3 不同温度热风干燥过程中不同状态水分的变化

Fig. 3 Integral peak area of different state water in hot air drying

干燥时结合水峰面积 A_{21} 变化最明显, 呈现先增加后减小再增加的趋势, 35 °C 时变化最小。75 °C 时不易流动水变化 (A_{22}) 呈现出迅速下降的趋势, 35 °C 时缓慢下降, 55 °C 时在干燥中期呈现出突然增大的趋势, 然后逐渐减小, 推测可能是由于不同温度条件对组织的破坏作用不一样, 使自由水向不易流动水转移。35 °C 干燥时自由水 (A_{23}) 呈现先增加后减小的趋势, 55 °C 时逐渐减少, 75 °C 时自由水呈波动性降低的规律, 经过 6 h 干燥后, 不同温度干燥下自由水均全部散失。即 35 °C 干燥时自由水、55 °C 干燥时不易流动水、75 °C 干燥时结合水都表现出先增加后减少的规律, 可见低温干燥对木瓜组织破坏较小, 更利于组织中不易流动水转化为自由水, 进而较快散失, 而高温干燥在前期就对光皮木瓜片组织结构造成破坏, 组织收缩变形, 水分与非水组分间的结合力出现短暂增强的现象。

4 讨论

新鲜光皮木瓜片中含有 3 种状态的水: 结合水、不易流动水和自由水, 其中约 85% 为自由水, 10% 左右为结合水, 其余为不易流动水。不同干燥方式下光皮木瓜片水分迁移变化总趋势相似, 随着干燥时间的增加, 总水分逐渐散失, 水分与非水组分的结合力会增强。

蒸制后光皮木瓜片水分状态发生明显变化, 94.8% 为不易流动水, 蒸制加快了光皮木瓜片的失水率, 蒸制后热风干燥与热风干燥下光皮木瓜片失水速率呈显著性差异。

分段式烘干中, 干燥的间歇阶段会发生不同状态水分之间的转换, 以重新达到相对稳定的平衡状态。不同温度的热风干燥相比, 水分状态变化规律不同, 低温干燥对光皮木瓜组织破坏较小, 更利于组织中不易流动水转化为自由水, 进而较快散失, 而高温干燥在前期就对光皮木瓜片组织结构造成破坏, 组织收缩变形, 水分与非水组分间的结合力出现短暂增强的现象。

干燥过程中 3 种状态的水分含量与 LF-NMR T_2 谱的峰面积有较高的相关性, LF-NMR 技术可较好地用于光皮木瓜水分状态变化规律的分析研究, 通过分析比较各种方式下水分变化规律, 在考虑提高干燥效率, 同时保持产品外观品质的情况下, 可采用蒸制后低温干燥的方式进行光皮木瓜片的干燥。

参考文献

[1] 刘世尧, 白志川, 李加纳. 皱皮木瓜与光皮木瓜品质多

性状指标综合评价 [J]. 中国中药杂志, 2012, 37(7): 901.

[2] 尹震花, 赵晨, 张娟娟, 等. 光皮木瓜的化学成分及药理活性研究进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 23(9): 221-229.

[3] 徐怀德, 秦盛华. 超声波辅助提取光皮木瓜多糖及其体外抗氧化性研究 [J]. 食品科学, 2010, 31(10): 106-111.

[4] Gao H Y, Wu L J, Kuroyanagi M. A new compound from *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne [J]. *Chin Chem Lett*, 2003, 14(3): 274-275.

[5] 于生, 张丽, 单鸣秋, 等. UFLC-MS 法同时测定木瓜饮片中 8 种有机酸 [J]. 中草药, 2016, 47(14): 2465-2469.

[6] 张林, 张兵, 李博, 等. 木瓜蛋白酶对兔膝关节骨关节炎滑膜病变的诱导作用 [J]. 药物评价研究, 2018, 41(1): 78-82.

[7] 纪学芳, 徐怀德, 刘运潮, 等. 光皮木瓜黄酮和多糖降血脂与抗氧化作用研究 [J]. 中国食品学报, 2013, 13(9): 1-7.

[8] 冯协和, 陈科力, 刘义梅. 木瓜抗氧化活性研究进展 [J]. 医药导报, 2016, 35(5): 491-495.

[9] 谭秋生, 罗敏, 任星宇, 等. 两种木瓜不同加工品中熊果酸和齐墩果酸含量的高效液相色谱法测定 [J]. 时珍国医国药, 2016, 27(3): 620-621.

[10] 李琼, 刘乐全, 徐怀德, 等. 光皮木瓜中有机酸成分研究 [J]. 西北农业学报, 2008, 17(1): 207-210.

[11] Li S, Guo L, Liu C, *et al.* Combination of supercritical fluid extraction with counter-current chromatography to isolate anthocyanidins from the petals of *Chaenomeles sinensis* based on mathematical calculations [J]. *J Sep Sci*, 2013, 36(21/22): 3517-3526.

[12] Fan D, Ma S, Wang L, *et al.* ^1H NMR studies of starch-water interactions during microwave heating [J]. *Carbohydr Polym*, 2013, 97(2): 406-412.

[13] 段文娟, 李月, 崔莉, 等. 低场核磁共振及成像技术分析白芍炮制过程中水分变化规律 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(11): 2092-2096.

[14] Xiao Q, Lim L T, Zhou Y, *et al.* Drying process of pullulan edible films forming solutions studied by low-field NMR [J]. *Food Chem*, 2017, 230(17): 611-617.

[15] 李然, 李振川, 陈珊珊, 等. 应用低场核磁共振研究绿豆浸泡过程 [J]. 食品科学, 2009, 30(15): 137-141.

[16] Shao J H, Deng Y M, Song L, *et al.* Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF-NMR technique [J].

- LWT-Food Sci Technol*, 2016, 66(3): 1-6.
- [17] Li M, Wang H, Zhao G, *et al.* Determining the drying degree and quality of chicken jerky by LF-NMR [J]. *J Food Eng*, 2014, 139(139): 43-49.
- [18] 邵小龙, 宋伟, 李云飞. 粮油食品低场核磁共振检测技术研究进展 [J]. 中国粮油学报, 2013, 28(7): 114-118.
- [19] Monakhova Y B, Kuballa T, Tschiersch C, *et al.* Rapid NMR determination of inorganic cations in food matrices: Application to mineral water [J]. *Food Chem*, 2017, 221(4): 1828-1833.
- [20] 马申嫣, 范大明, 王丽云, 等. 微波加热对马铃薯淀粉颗粒内部水状态及分布的影响 [J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 219-225.
- [21] 食品安全国家标准•食品中水分的测定 (GB-5009.3-2016) [S]. 2016.
- [22] 阮榕生. 核磁共振技术在食品和生物体系中的应用 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
- [23] Xiao Q, Lim L T, Zhou Y, *et al.* Drying process of pullulan edible films forming solutions studied by low-field NMR [J]. *Food Chem*, 2017, 230(9): 611-617.
- [24] 修彦凤, 曹艳花, 王平. 多指标综合评价优选木瓜润法和蒸法软化的炮制工艺 [J]. 时珍国医国药, 2009, 20(5): 1247-1249.