

基于低场核磁技术的不同花期金银花红外干燥过程中的水分变化

杜利平^{1,2}, 崔莉¹, 赵恒强¹, 闫慧娇¹, 王涛¹, 王晓¹

(1. 山东省中药质量控制技术重点实验室山东省分析测试中心, 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)

摘要: 本文研究了不同花期金银花(三青期、大白期和全花期)红外干燥过程中的水分分布及状态变化。不同花期金银花在 45 °C 条件下进行远红外干燥, 应用低场核磁共振技术(LF-NMR)分析金银花中水分随时间的迁移变化情况。结果表明, 不同花期的金银花中均含有三种状态的水: 结合水、半结合水和自由水, 其含量为: 半结合水>结合水>自由水; 三青期金银花的结合水和自由水含量高于大白期和开花期, 半结合水含量相对低于大白期和开花期; 金银花干燥过程中, 不同状态的水也呈现出不同的变化规律, 半结合水含量逐渐减小, 结合水含量先减少后增加, 干燥过程改变了金银花内部水分分布状态和水分含量, 不同状态的水分之间会发生一定的相互转化, 三青期金银花中部分结合水在干燥初期流动性变大, 后期流动性变小, 大白期金银花结合水流动性持续变小。干燥过程中金银花水分含量与半结合水的峰面积、总峰面积均有较高的相关性 ($R^2>0.9$), LF-NMR 技术为金银花中水分分布及变化规律提供了直观的参考依据。

关键词: 金银花; 红外干燥; 低场核磁共振技术(LF-NMR)

文章编号: 1673-9078(2017)9-189-194

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.9.028

Analysis of Moisture Changes in *Flos lonicerae* at Different Flowering Stages during Infrared Drying Using Low-field NMR

DU Li-ping^{1,2}, CUI Li¹, ZHAO Heng-qiang¹, YAN Hui-jiao¹, WANG Tao¹, WANG Xiao¹

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

(2. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Changes in water distribution and water states in *Flos lonicerae* during infrared drying were assessed at three different flowering stages (three green period, large white period, and golden flowering period). The three *F. lonicerae* samples were subjected to far-infrared radiation at 45 °C, and low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR) spectroscopy was employed to evaluate differences in water mobility and distribution. Three water states – bound water, immobilized water, and free water – were detected in *F. lonicerae* samples at different flowering stages, with volume fraction decreasing in the order: immobilized water > bound water > free water. The proportions of free water and bound water in the *F. lonicerae* sample at the three green stage were higher than those in the *F. lonicerae* samples at the big white and whole flowering stages, and the immobilized water content of the *F. lonicerae* sample at the three green stage was lower than those of the samples at the big white and whole flowering stages. During the drying process, different forms of water also exhibited different patterns of change; the immobilized water content decreased gradually, while the bound water content decreased at first and then increased. The drying process changed the internal water distribution and water content of the *F. lonicerae* samples, and interconversion between different forms of water occurred. The fluidity of the bound water increased during the initial period of drying, before decreasing during the final stages of the drying process. However, the fluidity of the bound water of the sample at the large white stage continued to decrease throughout the drying process. During the drying process, the water content of *F. lonicerae* was highly correlated with the peak area of immobilized water and the total peak area ($R^2 > 0.9$). Thus, the NMR technique used in this study provided an intuitive basis for the analysis of water distribution and variation in *F. lonicerae* at different flowering stages.

Key words: *Flos lonicerae*; infrared drying; low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR)

收稿日期: 2016-12-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (81473298); 山东省科技发展计划项目 (2014GSF119031); 山东省科学院先导专项

作者简介: 杜利平, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学; 崔莉, 女, 博士, 共同第一作者; 通讯作者: 王晓, 男, 博士

金银花 (*Flos lonicerae*) 为忍冬科植物忍冬 (*Lonicera japonica*) 的干燥花蕾或带初开的花^[1]。化学成分研究表明, 其富含黄酮类、挥发油及三萜类等活性成分^[2,3], 具有抗病毒、抑菌、解热、抗炎和止血等作用^[4,5], 是我国重要的药食两用资源。新鲜金银花含水量高达 80% 左右, 其采后干燥过程是影响其品质的关键环节, 目前, 金银花常使用阴干和热风干燥方式, 但存在传热效率低, 内部水分散失较慢等缺点, 易造成功效成分流失和褐变等不良影响^[6-8], 红外干燥是利用辐射传热的一种方法, 红外线传播到被干燥的物料, 当红外线的发射频率与被干燥物料中分子运动的固有频率相匹配时, 引起物料中的分子强烈振动, 在物料的内部发生激烈摩擦产生热而达到干燥的目的^[9], 与传统的干燥方式相比, 具有高效快速、热源简单、节约能源以及干燥质量好等特点, 且操作简便, 易于推广^[10,11]。

按照与非水组分的结合程度, 生物组织中水的存在形式主要分自由水和结合水两大类, 干燥能使大部分结合相对较弱的自由水脱去, 而结合水与大分子物质结合牢固, 束缚力较强, 一般不能通过干燥去除^[12]。为了提高干燥产品的质量, 对物料干燥过程中水分状态的变化研究是有必要的, 目前金银花红外干燥过程中水分状态的变化尚不明确。低场核磁共振 (low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 是一种有效的无损、无侵入的快速检测技术, 通过测量弛豫时间 T_1 和 T_2 , 从微观的角度解释样品中水分的分布及变化规律^[13-15]。近年来在多种食品的水分状态动态变化研究中成功应用, Xin Li^[16]和徐建国等^[17]利用 NMR 技术分别分析了牛肉粒切片及莲子干燥过程中水分的状态及分布; 刘丽萍^[18]和 Isabel Sánchez-Alonso 等^[19]分别研究了大平顶枣和鳕鱼贮藏过程中水分的状态及分布; Shaote Geng 等^[20]研究了海参复水过程中水分的状态及分布, 该技术在金银花中的应用研究尚未见报道。本研究在前期对金银花红外干燥过程中的干燥特性、失水动力学方程、金银花品质变化规律等研究^[21]的基础上, 采用 NMR 技术, 进一步深入研究不同花期金银花在红外干燥过程中的水分状态变化, 以期探讨金银花干燥过程中水分变化规律, 为金银花干燥加工提供科学理论依据及指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金银花于 2016 年 5 月采自江苏省苏州市, 分别于三青期、大白期以及全花期新鲜采摘, 挑选无机械伤,

大小均匀的备用。

Meso MR23-60 中尺寸核磁共振成像分析仪, 纽迈电子科技有限公司, 共振频率 23.318 MHz, 磁体强度 0.52 T, 磁体温度 32 °C; BAS124S 万分之一天平, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; 766B-3 型远红外辐射干燥箱, 上海浦东荣丰科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理

不同花期的金银花样品 (三青期 1.640 g, 大白期 1.980 g, 全花期 1.853 g) 进行低场核磁共振横向弛豫时间 (T_2) 的测定, 通过质量归一化计算, 得到单位质量核磁信号 T_2 谱图。

将三青期和大白期的鲜金银花样品平铺于红外干燥箱内中层隔板上, 红外功率 1.2 kW, 在 45 °C 条件下进行干燥, 分别在不同烘干时间 (0、0.5、1.5、2.5 和 4.5 h) 取样, 待样品温度降到室温, 进行横向弛豫时间 T_2 的测定。

1.2.2 横向弛豫时间 (T_2) 的测定

样品放入永久磁场中心位置的直径为 25 mm 的射频线圈中心, 采用多脉冲回波序列 CPMG 扫描采集核磁信号, 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 试验主要参数为: 主频 SF=23 MHz, 偏移频率 O1=407647.3 kHz, 90 度脉冲时间 P1=10 μ s, 180 度脉冲时间 P2=20 μ s, 累加采样次数 NS=16, 回波时间 TE=0.35 ms, 回波个数 NECH=10000。

2 结果与分析

2.1 不同花期新鲜金银花 T_2 谱图测定

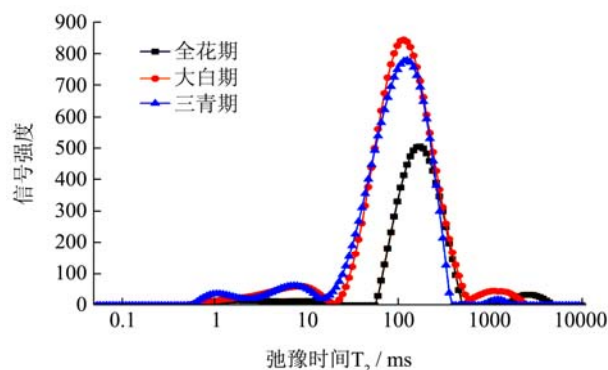


图1 新鲜金银花不同花期 T_2 谱图

Fig.1 T_2 spectra of fresh *Flos lonicerae* samples at different flowering stages

T_2 弛豫时间反映了样品内部氢质子所处的化学环境, 与氢质子所受的束缚力及其自由度有关, 而氢

质子的束缚程度又与样品的内部结构有密不可分的关系。金银花中水和其他成分间的相互作用是影响H质子弛豫过程的重要因素，水分受束缚越大或自由度越小， T_2 弛豫时间越短，在 T_2 谱上峰位置较靠左；反之则 T_2 弛豫时间越长，在 T_2 谱上峰位置较靠右。不同花期新鲜金银花 T_2 谱如图1所示，可见随着金银花生长，从三青期、大白期到开花期 T_2 谱上峰位置逐渐右移，特别是开花期，水分自由度变大。

表1 不同花期金银花弛豫时间 T_2

Table 1 The integral peak area of T_2 of the *Flos loniceræ* at different flowering stages

不同花期	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms
三青期	3.18	126.03	1217.38
大白期	8.70	116.23	1320.09
开花期	5.97	174.26	2523.54

表2 不同花期金银花 T_2 谱峰面积信息

Table 2 The T_2 peak area of the *Flos loniceræ* at different flowering stages

不同花期	A_{21}	A_{22}	A_{23}
三青期	881.67	10015.22	61.41
大白期	751.28	9273.59	305.07
开花期	584.15	9500.04	396.85

分析不同花期金银花的核磁共振 T_2 弛豫谱，发现金银花 T_2 弛豫时间分布范围较大，为0.1~10000 ms，不同样品的核磁共振 T_2 弛豫谱有3~4个峰，根据这种弛豫谱特征来界定水分的不同相态，经过加权之后将10与1000 ms处作为分界（图1）， T_2 谱中的峰分别对应金银花中三种状态的水：0~10 ms (T_{21})为结合水，水分子与生物大分子间紧密结合，动力学活性较小，10~1000 ms (T_{22})为半结合水，水分流动性受到限制，1000~10000 ms (T_{23})为自由水，水分的流动性强，峰积分面积分别代表三种状态水的相对含量^[22,23]，不同花期金银花弛豫时间 T_2 及各峰积分面积的结果如表1和表2所示。

不同花期新鲜金银花的水分状态存在差异，三青期金银花的结合水和半结合水含量相对较高，自由水含量相对较低，说明三青期的金银花对水的束缚力较

强，表层组织结构相对致密，蒸发至表面的水较少，大白期次之，开花期最弱。金银花在开花过程中，水分状态和含量会发生变化，可能是由于在开花过程中花的组织结构改变所造成的。

2.2 干燥过程中金银花 T_2 谱图的测定

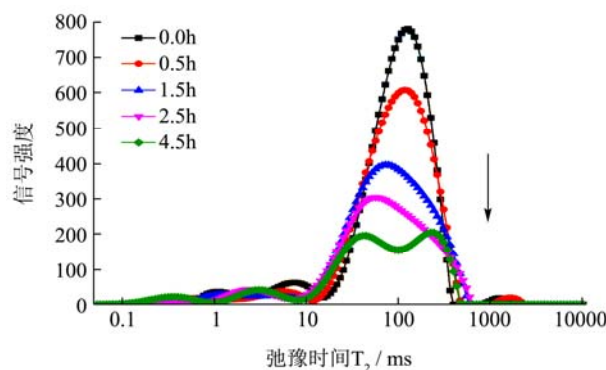


图2 三青期金银花红外干燥过程 T_2 谱图

Fig.2 Changes in the T_2 distribution of *Flos loniceræ* at the three green stage during infrared drying

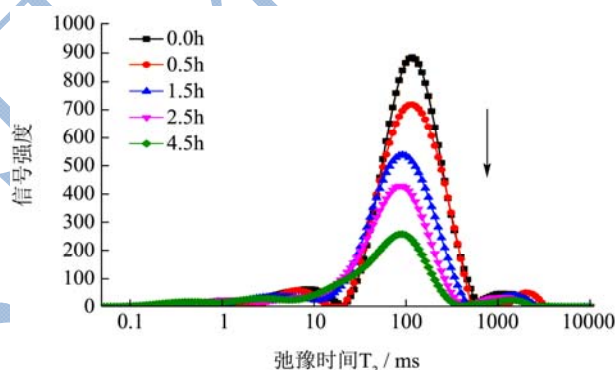


图3 大白期金银花红外干燥过程 T_2 谱图

Fig.3 Changes in the T_2 distribution of *Flos loniceræ* at the large white stage during infrared drying

干燥过程中，横向弛豫时间 T_2 的大小反映了不同状态水分的分布与变化情况， T_2 越小，水分自由度越小，表明水与所处环境中的大分子等的结合越紧密； T_2 越大，表明水分自由度越大，越容易除去^[24]。三青期和大白期金银花在45℃干燥过程中不同时间的 T_2 谱如图2和图3所示。

表3 三青期金银花干燥过程 T_2 谱的积分峰面积

Table 3 Integral peak area of the T_2 distribution of *Flos loniceræ* at the three green stage

干燥时间/h	质量/g	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{Σ}
0	1.640	1445.58	16420.96	100.69	17967.24
0.5	1.497	964.94	15283.73	124.26	16372.93
1.5	1.218	769.51	12138.07	-	12907.58
2.5	1.035	892.05	9730.80	-	10622.85
4.5	0.842	1022.55	3939.16	3001.94	7963.649

表4 大白期金银花干燥过程 T_2 谱的积分峰面积Table 4 Integral peak area of the T_2 distribution of *Flos lonicerae* at the large white stage

干燥时间/h	质量/g	A_{21}	A_{22}	A_{23}	$A_{总}$
0	1.980	1419.99	17528.03	576.62	19524.64
0.5	1.689	1055.53	16411.77	388.17	17855.46
1.5	1.331	910.08	12564.44	443.39	13917.92
2.5	1.089	494.86	10283.85	429.12	11207.82
4.5	0.867	884.17	6277.16	309.43	7470.752

从 T_2 谱可见在干燥过程中三种状态水分变化具有相似的规律性：一是峰面积均逐渐变化，说明干燥过程改变了金银花内部水分分布状态和水分含量；二是随着干燥时间的延长，不同状态水分的峰顶位置向左发生了移动，即横向弛豫时间 T_2 逐渐缩短，水分流动性变差。金银花在三青期和大白期的 T_2 谱中各峰面积如表3和表4所示。

通过分别计算不同弛豫时间 T_2 对应的峰面积 (A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23}) 可以定量计算出三青期和大白期金银花中结合水、半结合水和自由水的相对含量。三青期新鲜金银花中三种状态的水分分别占总水分的8.0%、91.4%和0.6%，大白期新鲜金银花中三种状态的水分分别占总水分的7.3%、89.8%和3.0%，可见金银花中水分主要以半结合水状态存在。

随着烘干时间的延长，三青期和大白期金银花中结合水含量 (A_{21}) 呈现先下降趋势后略有上升的规律，推测干燥后期，由于金银花干燥收缩组织结构发生变化，部分半结合水与大分子间的结合变得相对更加紧密，即向结合水方向转化，干燥过程中物料内部存在一定的温度梯度^[25]，改变金银花内部原有的热力学平衡状态，使低熵、低序状态的水向高能级、有序状态的水移动。在整个干燥过程中，半结合水含量持续减少，这也是金银花干燥失水的主要原因。三青期金银花干燥至4.5 h时自由水含量增加，可能此时金银花细胞组织被破坏，部分半结合水在组织中受到的束缚作用力减小，导致自由水含量增高。大白期金银花中结合水和半结合水含量变化趋势与三青期基本相同。

表5 三青期金银花干燥过程中 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 变化Table 5 Changes in T_{21} , T_{22} , and T_{23} of *Flos lonicerae* at the three green stage during infrared drying

干燥时间/h	质量/g	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms
0	1.640	3.18	126.03	1217.38
0.5	1.497	3.62	116.23	1683.18
1.5	1.218	2.65	71.49	1098.23
2.5	1.035	2.40	56.07	453.98
4.5	0.842	2.33	40.55	222.19

三青期金银花干燥过程中 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 变化如表5所示，在干燥初期0~0.5 h范围内弛豫时间 T_{21} 呈现上升趋势，说明在干燥过程初期，金银花中部分结合不紧密的结合水向流动性较大的方向发生了移动，造成结合水的弛豫时间增加；0.5~4.5 h范围内， T_{21} 和 T_{22} 均逐渐降低，这是由于受热导致半结合水一部分蒸发损失，一部分向结合更紧密的方向发生了移动，推测可能是因为在干燥过程中，一部分半结合水与细胞壁接触，而细胞壁中多糖等具有的亲水基团结构可以减少周围流动的动态水，因此半结合水流动性变差，向结合水迁移^[26]；在4.5 h时， T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 均最小，表明此时金银花内剩余水分和大分子物质紧密结合，流动性很低，说明大部分水分经干燥除去，仅剩余少量不易去除的结合水，达到安全干燥水平。

表6 大白期金银花干燥过程中 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 变化Table 6 Changes in T_{21} , T_{22} , and T_{23} of *Flos lonicerae* at the large white stage during infrared drying

干燥时间/h	质量/g	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms
0	1.980	8.70	116.23	1320.08
0.5	1.689	5.23	116.23	1979.16
1.5	1.331	4.01	91.15	1431.45
2.5	1.089	2.54	84.06	1122.66
4.5	0.867	1.72	91.15	1431.45

大白期金银花干燥过程中 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 变化如表6中所示，在整个干燥过程中大白期金银花的弛豫时间 T_{21} 下降趋势明显，即结合水的 T_2 峰不断左移，部分水的结合程度更强了，同时结合表4中 A_{21} 逐渐减小的变化分析，可能随着干燥进行，金银花组织结构发生变化，结合水中一部分向半结合水方向发生了转变，仅剩余少部分结合相对更加紧密的水，从而结合水的相对含量逐渐减少而结合程度逐渐增强，这与三青期金银花干燥过程中 T_{21} 的变化规律不同，推断是大白期和三青期的金银花组织结构不同导致的，其机理还需进一步研究，大白期 T_{22} 和 T_{23} 变化趋势与三青期基本相同。

2.3 干燥过程中金银花 LF-NMR 参数与水分

含量相关性分析

表7 三青期金银花干燥过程中 LF-NMR 参数与水分含量相关性分析

Table 7 Comparison of water content and T₂ of *Flos lonicerae* at the three green stage during infrared drying

	水分含量/%	T ₂₁ /ms	T ₂₂ /ms	T ₂₃ /ms	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A _总
水分含量/%	1	0.732	0.913	0.828	0.169	0.993	-	0.974
T ₂₁ /ms		1	0.852	0.877	0.130	0.693	-	0.779
T ₂₂ /ms			1	0.778	0.348	0.876	-	0.976
T ₂₃ /ms				1	0.025	0.800	-	0.784
A ₂₁					1	0.143	-	0.285
A ₂₂						1	-	0.949
A ₂₃							1	-
A _总								1

表8 大白期金银花干燥过程中 LF-NMR 参数与水分含量相关性分析

Table 8 Comparison of water content and T₂ of *Flos lonicerae* at the large white stage during infrared drying

	水分含量/%	T ₂₁ /ms	T ₂₂ /ms	T ₂₃ /ms	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	A _总
水分含量/%	1	0.825	0.643	0.122	0.461	0.992	0.592	0.990
T ₂₁ /ms		1	0.699	0.024	0.742	0.825	0.736	0.859
T ₂₂ /ms			1	0.382	0.737	0.700	0.199	0.725
T ₂₃ /ms				1	0.117	0.149	0.098	0.143
A ₂₁					1	0.468	0.309	0.519
A ₂₂						1	0.551	0.997
A ₂₃							1	0.567
A _总								1

将金银花干燥过程中的水分含量变化与 T₂ 值及峰面积进行相关性分析, 相关系数 R² 结果见表 7 和表 8。三青期金银花水分含量与 T₂₂、A₂₂ 和 A_总 有较高的相关性 (R²>0.9), 大白期金银花水分含量与 A₂₂ 和 A_总 有较高的相关性 (R²>0.9), 即 LF-NMR 分析中 T₂ 谱的峰面积的变化可以表征水分含量的变化, 可见, LF-NMR 技术可以很好的进行金银花中水分状态变化规律的分析研究。

3 结论

3.1 三个花期的金银花中各状态水分含量均为: 半结合水>结合水>自由水, 金银花在开花过程中, 随着花的组织结构改变, 水分状态和含量也发生变化, 三青期金银花的结合水和半结合水含量高于大白期和开花期, 自由水含量低于大白期和开花期, 三青期时金银花对水的束缚力较强, 表层组织结构相对致密, 大白期次之, 开花期最弱。

3.2 干燥过程改变了金银花内部水分分布状态, 在 45 °C 红外干燥过程中, 三青期和大白期金银花中的结合水和半结合水含量变化规律相同, 半结合水含量逐渐减小, 结合水含量呈现先减少后增加的趋势, 随着

干燥时间的延长, 不同状态的水分之间会发生一定的相互转化。三青期金银花在干燥过程初期, 部分结合水流动性变大, 后期流动性变小, 大白期金银花结合水流动性持续变小。干燥过程中金银花水分含量与 T₂ 谱的峰面积有较高的相关性, 低场核磁共振技术可以很好的进行金银花中水分状态变化规律的分析研究。

参考文献

[1] 李亚荣,杨沛霖.金银花有效成分检测方法研究进展[J].西部中医药,2012,25(6):109-110
 LI Ya-rong, YANG Pei-lin. Progress on detection of active ingredients in honeysuckle [J]. Western Journal of Traditional Chinese Medicine, 2012, 25(6): 109-110

[2] 宋亚玲,倪付勇,赵祎武,等.金银花化学成分研究进展[J].中草药,2014,45(24):3656-3664
 SONG Ya-ling, NI Fu-yong, ZHAO Yi-wu, et al. Research progress on chemical constituents from *Lonicerae Flos* [J]. Chinese Traditional & Herbal Drugs, 2014, 45(24): 3656-3664

[3] 夏远,李弟灶,裴振昭,等.金银花化学成分的研究进展[J].中国现代中药,2013,14(4):26-32

- XIA Yuan, LI Di-zao, PEI Zhen-zhao, et al. Research progress on chemical constituents from *Lonicerae Flos* [J]. Modern Traditional Chinese Medicine, 2013, 14(4): 26-32
- [4] 徐晖. 金银花药理作用研究进展[J]. 湖南中医杂志, 2013, 29(9):148-150
- XU Hui. Advances in pharmacological effects of honeysuckle [J]. Journal of Hunan Medicine, 2013, 29(9): 148-150
- [5] 陈继明, 洪超群. 金银花药理作用分析[J]. 亚太传统医药, 2015, 11(5):43-44
- CHEN Ji-ming, HONG Chao-qun. The pharmacological effects analysis of *Lonicerae Flos* [J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2015, 11(5): 43-44
- [6] 宋健, 张会敏, 石俊英. 金银花最佳产地加工方法-杀青烘干干燥法[J]. 中药材, 2008, 31(4):489-491
- SONG Jian, ZHANG Hui-min, SHI Jun-ying. Optimal process of *Flos Lonicerae* in producing area-kill-enzyme torrefaction [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2008, 31(4): 489-491
- [7] 熊艳, 高慧敏, 王智民, 等. 金银花不同干燥技术 HPLC 指纹图谱研究[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(8):1015-1017
- XIONG Yan, GAO Hui-min, WANG Zhi-min, et al. Study on HPLC fingerprint of different drying techniques of *Flos Lonicerae* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2009, 34(8): 1015-1017
- [8] 彭菊艳, 龚月桦, 王俊儒, 等. 不同干燥技术对金银花药用品质的影响[J]. 西北植物学报, 2006, 26(10):2044-2050
- PENG Ju-yan, GONG Yue-hua, WANG Jun-ru, et al. Effects of different drying methods on officinal qualities of *Flos Lonicerae* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(10): 2044-2050
- [9] 王文倩, 王晗琦, 陈文, 等. 不同干燥方法对核桃品质及不饱和脂肪酸稳定性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(1):59-65
- WANG Wen-qian, WANG Han-qi, CHEN Wen, et al. Effects of different drying methods on quality of walnuts and stability of unsaturated fatty acids [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 33(1): 59-64
- [10] Swasdisevi T, Devahastin S, Sa-Adchom P, et al. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(1): 100-106
- [11] Leonard A, Blacher S, Nimmol C, et al. Effect of far-infrared radiation assisted drying on microstructure of banana slices: An illustrative use of X-ray microtomography in microstructural evaluation of a food product [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 154-162
- [12] Fan Da ming, Ma Shen yan, Wang Li yun, et al. ¹H NMR studies of starch-water interactions during microwave heating [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97(2): 406-412
- [13] 张建峰, 吴迪, 龚向阳, 等. 基于核磁共振成像技术的作物根系无损检测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):181-185
- ZHANG Jian-feng, WU Di, GONG Xiang-yang, et al. Non-destructive detection of plant roots based on magnetic resonance imaging technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 181-185
- [14] Shigeki T, Mika F. An application of magnetic resonance imaging to the real time measurement of the change of moisture profile in a rice grain during drying [J]. Journal of Food Engineering, 1997, 33(1): 181-192
- [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
- LI Ran, LI Zhen-Chuan, CHEN Shan-shan, et al. Study of Water absorption of mung beans based on low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. Food Science, 2009, 30(15): 137-141
- [16] Li Xin, Ma Li-zhen, Tao Yuan, et al. Low field-NMR in measuring water mobility and distribution in beef granules during drying process [J]. Advanced Materials Research, 2012, 550-553(550-553): 3406-3410
- [17] 李冰, 尹青, 殷丽君, 等. 香菇热风微波流态化的干燥特性与机理分析[J]. 中国食品学报, 2015, 15(5):134-139
- LI Bing, YIN Qing, YIN Li-jun, et al. Drying characteristics and mechanism of hot-air microwave drying of mushrooms [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(5): 134-139
- [18] 刘丽萍, 李雨露, 于越, 等. 低场核磁共振技术研究钙处理对大平顶枣保鲜效果[J]. 食品与发酵科技, 2014, 2:16-19
- LIU Li-ping, LI Yu-lu, YU Yue, et al. Effect of calcium treatment on preservation of Dapingding jujube by low-field NMR technology [J]. Food & Fermentation Technology, 2014, 2: 16-19
- [19] Sánchez-Alonso I, Martínez I, Sánchez-Valencia J, et al. Estimation of freezing storage time and quality changes in hake (*Merluccius merluccius*, L.) by low field NMR [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1626-1634
- [20] Geng S, Wang H, Wang X, et al. A non-invasive NMR and MRI method to analyze the rehydration of dried sea cucumber [J]. Analytical Methods, 2015, 7(6): 2413-2419
- [21] 杜利平, 赵恒强, 周冰谦, 等. 金银花红外鼓风干燥特性、失水

- 动力学及干制品品质研究[J].食品工业科技,2016, 37(16): 93-102
- DU Li ping, ZHAO Heng qiang, ZHOU Bing qian, et al. Drying characteristics, drying kinetics and product quality of *Flos Lonicerae* during infrared-forced air drying [J]. Science & Technology of Food Industry, 2016, 37(16): 93-102
- [22] 牟红梅,何建强,邢建军,等.小麦灌浆过程籽粒水分变化的核磁共振检测[J].农业工程学报,2016,32(8):98-104
- MOU Hong-mei, HE Jian-qiang, XING Jian-jun, et al. Water changes in wheat spike during grain filling stage investigated by nuclear magnetic resonance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(8): 98-104
- [23] 阮榕生,林向阳,张锦胜.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
- RUAN Rong-sheng, LIN Xiang-yang, ZHANG jin-sheng. Application of nuclear magnetic resonance technique in food and biological system [M]. China Light Industry Press, 2009
- [24] Saeed Faal, Teymor Tavakoli, Barat Ghobadian. Mathematical modeling of thin layer hot air drying of apricot with combined heat and power dryer [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(5): 2950-2957
- [25] 徐建国,徐刚,张森旺,等.热泵-热风分段式联合干燥胡萝卜片研究[J].食品工业科技,2014,35(12):230-235
- XU Jian-guo, XU Gang, ZHANG Sen-wang, et al. Heat pump and hot air combined drying of carrot slices [J]. Science & Technology of Food Industry, 2014, 35(12): 230-235
- [26] Einhorn-Stoll U, Hatakeyama H, Hatakeyama H. Influence of pectin modification on water binding properties [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 494-502