

田 靖,王 玲.核磁共振技术在农业中的应用研究进展[J].江苏农业科学,2015,43(1):12-15.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.004

# 核磁共振技术在农业中的应用研究进展

田 靖,王 玲

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,江苏南京 210016)

**摘要:**核磁共振技术是一种新型的无损检测技术,本文介绍了核磁共振技术的基本原理和分类,综述了国内外有关核磁共振技术在农业生产中的应用情况,并展望了该技术在未来农业生产中的应用前景。

**关键词:**核磁共振;农业;应用;无损检测;研究进展

**中图分类号:** S129      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0012-04

核磁共振(NMR)是指在恒定磁场与交变磁场的作用下,具有固定磁矩的原子核(如 $^1\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}$ 等)与交变磁场发生相互作用的基本物理现象,其本质是一种能级间跃迁的量子效应。荷兰物理学家 Goveter 在 20 世纪中期最先发现了核磁共振效应;随后,美国物理学家 Purcell 和 Bloch 分别领导 2 个小组对该方法加以完善,观察到一般状态下物质的核磁共振现象,并因此获得了 1952 年诺贝尔物理学奖<sup>[1]</sup>。1973 年 Lauterbur 通过试验首次得到了 NMR 图像,并由此产生了核磁共振技术的另一个分支——核磁共振成像技术(MRI)。

近年来,随着农业生产及农业发展方式的变化,农业检测技术也得到了快速发展,其中常规分析及色谱分析技术已得到广泛应用,核磁共振技术在农业中的应用也得到了广泛关注。20 世纪 70 年代初,核磁共振技术开始在农业科学领域运用,相对于传统的检测方式,核磁共振技术具有以下优点:可以快速定量分析检测样品,无须添加标样,能够保持样品的完整性;操作简单快速,测量准确,可重复性高;测试结果受材料样本影响较小,且不受测试人员的技术与判断所影响<sup>[2]</sup>;属于一种非破坏性的检测手段。本文介绍了核磁共振技术的基本原理及分类,综述了国内外有关核磁共振技术在农业生产中的应用情况,并展望了其在未来农业生产中的应用前景,以期为更好地在农业领域应用核磁共振技术提供支撑。

## 1 核磁共振技术的分类

核磁共振技术是通过化学位移理论发展起来的,根据射频频率的高低,可分为低分辨率核磁共振法和高分辨率核磁共振法。低分辨率核磁共振法是通过核磁共振谱信号来分析食品理化性质,信号最初强度与样品中原子核数量直接相关。由于价格相对低廉、仪器体积较小等优点,低分辨率核磁共振法已成为食品工业中应用较为广泛的技术。高分辨率核磁共振法用于研究化合物的分子结构,目前应用最广泛的是氢核核磁共振法( $^1\text{H}$ -NMR)和碳核核磁共振法( $^{13}\text{C}$ -NMR)。由于相关产品结构复杂,该技术还只限于非常简单的食品模型<sup>[3]</sup>。核磁共振成像技术主要应用于医学领域,

在得到病人内部影像的同时,不对病人身体造成伤害。随着技术进步,核磁共振成像技术在农业中的应用也得到了发展。

### 1.1 低分辨率核磁共振法

低分辨率核磁共振是指磁场强度在 0.5 T 以下的核磁共振,其波谱信号的最初强度与样品中的原子核数量直接相关。在最低干扰状态下,研究人员无须对样品进行物理处理便能观察到样品内部结构的状况<sup>[4]</sup>。该技术一般被用于测定农产品中水分、脂肪、蛋白质含量。

低分辨率核磁共振法具有价格低廉、快速无损、测定精准等特点,许多小型、操作简单的低分辨率核磁共振仪不断被研发出来,以满足对农产品检测等方面的实际研究需要。

### 1.2 高分辨率核磁共振法

高分辨率核磁共振主要被应用于化合物分子结构分析,目前应用最广泛的高分辨率核磁共振法是 $^1\text{H}$ -NMR 和 $^{13}\text{C}$ -NMR。此外,通过对 $^{11}\text{B}$ 、 $^{17}\text{O}$ 、 $^{19}\text{F}$ 、 $^{31}\text{P}$ 等原子核的研究可以确定大分子高聚物的结构,这也有助于农药等化学品的成分分析研究。但是由于农业相关产品和食品的结构复杂,高分辨率核磁共振法还只能限于简单的分析模型等,该方法在农业中的应用还须进一步研究。

### 1.3 核磁共振成像法

核磁共振成像是通过所释放的能量在物质内部不同结构环境中的衰减,依据外加梯度磁场检测所发射出电磁波的不同,来分析构成这一物体原子核的位置和种类。

核磁共振成像技术利用信号波在样品中的定位,为农产品和食品内部结构的直观透视研究提供了强有力的手段,能够有效研究水果和蔬菜的内部结构、水分分布及果实成熟度。将核磁共振成像技术应用在农产品检测上,不用破坏样品,可以对完整的样品进行扫描,扫描以后样品仍然可以食用。

随着经济技术迅速发展,核磁共振技术在农业食品、物理化学、石油化工、考古等其他领域开辟了许多新的研究途径。目前,生产核磁共振检测仪器的知名公司有德国布鲁克公司、美国培安公司、英国牛津仪器公司、日本电子株式会社等,各种型号的核磁共振波谱仪已被广泛应用于农业生产中。

## 2 核磁共振技术在农业中的应用

### 2.1 核磁共振技术在农产品检测中的应用

#### 2.1.1 农产品水分测定 核磁共振技术能通过测定 H 原子

收稿日期:2014-09-27

作者简介:田 靖(1990—),女,江苏南京人,硕士,主要从事有机化学及仪器分析研究。E-mail:Tjtj3025@qq.com。

通信作者:王 玲,副教授。E-mail:354035358@qq.com。

核在磁场中的纵向弛豫时间  $T_1$  和横向弛豫时间  $T_2$  来分析样品含水量、水分分布、迁移及与之相关的其他性质<sup>[5]</sup>。将核磁共振技术用于农产品水分的测试,可以分析水分在农产品中的含量、分布及存在状态,从而研究其对农产品品质、加工特性和稳定性的影响。邵晓龙等利用低场核磁及其成像技术研究甜玉米粒中水的分布和状态,探讨了烫漂后甜玉米失重与热特性参数变化的原因;通过加权成像技术,观察发现烫漂后的甜玉米粒中新出现的水信号分布区;通过对烫漂时间和温度对甜玉米粒横向弛豫信号影响的研究,发现弛豫时间为 450 ~ 750 ms 和 50 ~ 70 ms 的结合水的比例发生了明显变化<sup>[6]</sup>。Bertram 等利用低场的核磁共振技术研究了猪肉中的水分分布与流动,发现与额外的肌原纤维蛋白水分子数量相关的核磁共振数据和膜完整性的阻抗特性具有联系,且纵肌的收缩与横肌缩水是肌原纤维蛋白中水分逸出的主要动力<sup>[7]</sup>。李资玲等利用核磁共振技术测定了 3 种不同配方的面包在和面、发酵、醒发、焙烤过程中质子的自旋-自旋弛豫时间( $T_2$ ),结果表明在面包制作过程中,束缚相和自由相的迁移行为不同, $T_{21}$  部分即“束缚水”部分流动性一直呈下降趋势,其含量在前 3 个阶段稍有上升,而在焙烤阶段开始下降,且趋势非常明显; $T_{22}$  部分即“自由水”部分的流动性在前 3 个阶段呈下降趋势,在焙烤阶段回升<sup>[8]</sup>。马斌利用核磁共振技术对 -40 ~ -20 °C 储藏的牛肉、橘汁、面团等样品进行非冻结水分含量分析,结果表明温度降低时,产品中水分会发生冻结,非冻结水分含量也会显著减少,并可以利用单点斜面图像描绘出产品水分分布的一维、二维图像,从而为如何保证冻藏过程中样品品质提供了依据<sup>[9]</sup>。

**2.1.2 农产品油脂含量测定** 油脂因其营养、风味越来越受到美食家的重视。在实验室中油脂质量控制采用固体脂肪指数(SFI)分析农产品中油脂的含量<sup>[10]</sup>,而目前核磁共振技术成为取代该方法的唯一可行、有潜在用途的仪器分析方法。早期核磁共振技术主要被用于油料种子含油量的测定<sup>[11]</sup>,现在已经形成了国际标准分析的方法<sup>[12]</sup>。Toussaint 等用带单油参照试管自校准体系的核磁共振技术,测定了鲑鱼肉中的脂质含量<sup>[13]</sup>。与传统的化学提取法相比,核磁共振技术分析时间短,不需溶剂,操作简单。研究人员利用核磁共振技术图像法测定了牛肉中脂肪含量,通过对比肉中不同质构(脂肪、瘦肉、连接组织)的差异,易于观察分析肉的切面,测得准确的脂肪含量;也能通过梯度场核磁共振技术,抑制水的信号,产生多变量的数据,精确测定肉中的脂肪含量。Vanlent 等利用核磁共振技术和共焦激光扫描显微镜检测法(CSLM)测定了 6 种工艺制作的黄油中小水滴的尺寸及分布,来确定黄油中微生物稳定性和感官品质,结果发现各种工艺所制黄油的小水滴性状表现出明显不同<sup>[14]</sup>。朱旭东等研究了利用核磁共振技术测定油脚残油率的理论,得到了测试方法,并将其与标准法即质量法进行对比分析,发现核磁共振法测定油脚残油率具有准确、经济适用等特点<sup>[15]</sup>。

**2.1.3 农产品糖分测定** 核磁共振技术对糖分测定的研究主要集中在化学结构方面。利用红外光谱或一些其他分析手段无法区分类似的糖分化学结构,而利用<sup>13</sup>C-NMR 等核磁共振技术可以将糖残基数目、单糖种类、端基构型、糖基连接方式和序列以及取代基团的连接位置等推测出来<sup>[16]</sup>。祝耀

初等报道了利用核磁共振技术测定食品中糖分的研究,有关分析中常用氘水或氘代二甲亚砜作为溶剂,其测定结果代表了结晶态时糖的构型和纯度<sup>[17]</sup>。此外,糖的各羟基都与同碳质子相偶合而产生裂分的双峰也能被检测到。Blundell 等利用 900 MHz 超高场核磁共振技术研究了由高度重复单元构成的糖氨聚糖透明质酸六糖的结构,通过核磁共振技术测试发现,糖氨聚糖透明质酸六糖是由 *N*-乙酰-*D*-葡萄糖胺和 *D*-葡萄糖醛酸组成的重复双糖单位所构成的,大部分由  $\beta$  连接构成,且不含有能提高分离度的硫酸基等取代基团<sup>[18]</sup>。

**2.1.4 农产品蛋白质与氨基酸含量测定** 核磁共振技术是能够在原子分辨率下测定溶液中生物大分子三维结构的唯一方法<sup>[19]</sup>,是研究蛋白质与氨基酸结构、空间构型及动力学的重要研究手段。Niccolai 等在研究 MNEI(一种含 96 种氨基酸的甜蛋白)时,利用带顺磁探头的梯度核磁共振图谱仪研究其表面结构,确定了该甜蛋白可能的络合部位及与水的络合情况<sup>[20]</sup>。Alberti 等研究发现,面团的黏弹性主要受水合状态下麦谷蛋白中高相对分子质量亚基的二级结构影响;并利用高分辨率魔角旋转技术的<sup>1</sup>H-NMR 测试,得到了谷氨酸残基不仅位于  $\beta$ -转折结构上,也有位于  $\beta$ -折叠等更有流动性的结构的研究结果<sup>[21]</sup>。刘兴前等通过核磁共振技术检测农产品,获得了 19 种氨基酸的<sup>1</sup>H-NMR 谱图,与《Handbook of Proton-NMR Spectra and Data》中相应的氨基酸图谱进行比较,其中 *L*-Ala、*D*-Ala、*L*-Leu、*L*-Pro 等 6 种氨基酸完全一致,其余 13 种非常类似;并首次获得了 *L*-丝氨酸和 *L*-色氨酸的<sup>1</sup>H-NMR 谱<sup>[22]</sup>。

**2.1.5 农产品淀粉含量测定** 利用核磁共振技术检测淀粉含量,主要是利用体系中不同质子的弛豫时间,研究淀粉颗粒结构、糊化凝成、回生和玻璃态转化等<sup>[23-24]</sup>。Vodovotz 等利用质子交叉弛豫核磁共振技术,研究了淀粉在发生玻璃化相变时的分子特性,通过光谱中谱线峰变宽可知淀粉分子结构发生的相变化<sup>[25]</sup>。Tananuwong 等利用脉冲质子核磁共振技术研究了蜡质玉米、普通玉米、马铃薯、豌豆淀粉的糊化性质,测试所得的  $T_2$  显示,糊化过程中淀粉颗粒内外的水进行了快速交换,加热后产生相对均一的胶体,且结果出现 2 个不同的  $T_2$  值,得到了淀粉糊化时水存在 2 种状态的结论<sup>[26]</sup>。

Cornillon 等利用低分辨率核磁共振技术研究了玉米片在牛奶中浸泡时  $T_1$  和  $T_2$  的变化,在玉米淀粉和水的混合体系中,随着淀粉浓度上升,在 30 ~ 60 °C 时  $T_1$  和  $T_2$  减少;大于 60 °C 后,弛豫时间随之增加<sup>[27]</sup>。

**2.1.6 农产品玻璃态及玻璃态转变温度的测定** 研究发现,测定食品聚合物的玻璃态转变温度  $T_g$  是指导控制食品产品质量和稳定性的关键因素之一<sup>[28-29]</sup>。采用核磁共振技术测定玻璃态转变温度是近年来兴起的一项新技术,它能够进行快速、准确、实时、全方位地定量测定,且不对样品具有破坏性,在测量食品的玻璃化转变温度方面具有广阔应用前景<sup>[30]</sup>。林向阳选择具有代表性的聚合物食品,在不同温度条件下进行了弛豫时间  $T_2$  与温度  $T$  的核磁共振测试,得到二者相关性曲线图,结果发现,斜率  $K_{BT}$ 、 $K_{PT}$  和转折点温度  $T_{um}$  是引起食品结块现象的主要因素, $K_{BT}$  和  $K_{PT}$  的值越大,结块速率也越快<sup>[31]</sup>。Ronaldo 等利用弛豫时间  $T_2$  与温度  $T$  的关系,研究了新鲜大西洋马鲛鱼的玻璃化转变温度,结果曲线上出现

了  $-6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  2 个转折点,这 2 个温度分别表示冻结自由水和结合水(冰)的熔点<sup>[32]</sup>。

**2.1.7 农产品成熟度与损伤程度的测定** 核磁共振技术能够显示出果实内部组织的高清晰图像。在果实中,压伤或腐烂的组织会因水浸而产生较强的核磁共振信号,而空穴和发生絮状变质部位则信号减弱或没有信号,因此可以判断出果实的成熟及变质情况<sup>[33]</sup>。 $^1\text{H}$ -MRI 技术因具有非侵入、无破坏性、提供高分辨率的空间信息等特点,成为监控果蔬品质,分析果蔬组织结构中水分的有效工具<sup>[34]</sup>。Chaughule 等用自由感应衰减(FDI)谱测定了人心果中的可溶性碳水化合物,通过比较成熟与未成熟果实的 $^{13}\text{C}$ -NMR 谱发现:前者的葡萄糖和果糖各有 1 个峰,而未成熟果实只有 1 个蔗糖峰;该研究也利用 $^1\text{H}$ -NMR 检测了人心果果实中的水分,结果表明:在果实生长的早期,波峰较宽,说明水分的活动性受到限制;而对于成熟果实,糖峰在水峰的右边且稍低,峰形不对称,推测水与可溶性碳水化合物之间具有相互作用<sup>[35]</sup>。因此,可从人心果的 $^{13}\text{C}$ -NMR 谱和 $^1\text{H}$ -NMR 谱的峰特点推测出人心果中水和碳水化合物的组成和状态。Ishida 等利用核磁共振成像技术研究西红柿时发现,未成熟西红柿的弛豫时间较长,而成熟西红柿的弛豫时间相对较短,果肉中含水量较多<sup>[36]</sup>。Chen 等利用核磁共振成像技术获得了不同水果、蔬菜的二维质子密度成像图,能够直接观察到与质量有关的不良现象,如碰伤、虫眼、干区等<sup>[37]</sup>。

**2.1.8 农产品品质鉴定** 近年来,核磁共振技术在农产品品质鉴定中得到了广泛应用。Andreotti 等利用 $^{13}\text{C}$ -NMR 分析了 15 个牛奶样品,发现牛奶中脂肪酸含量可作为鉴别真伪的特征成分,并成功鉴别出奶牛奶和水牛奶的不同<sup>[38]</sup>。王乐等利用核磁共振技术分别测定了泔水油、地沟油和 3 种食用油(菜籽油、花生油、大豆油)在  $0, 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的固体脂肪含量,发现杂油的固体脂肪含量较高,而食用油的固体脂肪含量几乎为 0,可以利用这一特性鉴别食用植物油的掺伪现象,食用植物油中只要掺入 1% 以上的餐饮业废油即可被检测出来;随着废油掺入量的增加,食用油的固体脂肪含量也随之增大,并且检测出的固体脂肪含量还可定量测出废油脂的掺入量<sup>[39]</sup>。

## 2.2 核磁共振技术在农业生产中的应用

**2.2.1 核磁共振技术在探测水源中的应用** 在地质复杂地区寻找水源是研究热点,掌握好勘测技术和拥有先进勘测设备是解决该问题的根本方法。利用核磁共振原理探测地下水,是解决这些问题的有效、直接方法<sup>[40]</sup>。核磁共振系统的工作原理:如果探测深度范围内地层中存在自由水,就有核磁共振信号响应(核磁响应 PMR),含水量越多,响应越强<sup>[41]</sup>。研究人员利用核磁共振技术在前人认为是非含水地区的湖北省永安地区找到了优质岩溶水<sup>[42]</sup>,为农牧业和工业生产以及旅游业提供了充分水源。在花岗岩发育的河北省康保地区,研究人员利用核磁共振技术在风化的花岗岩中找到了地下水<sup>[43]</sup>。

**2.2.2 核磁共振技术在土壤腐殖质研究中的应用** 腐殖质是土壤有机质的主要部分,是土壤中特有的一类有机物。将核磁共振技术用来研究土壤腐殖质及其腐殖化过程已有 20 多年,最初只能测定部分液体样品且灵敏度较差;引入傅里叶变化技术应用的核磁共振技术不但提高了测定土壤有机质的

灵敏度,消除了无机离子的干扰,且能直接测定固体样品<sup>[44]</sup>。同时,固相 $^{13}\text{C}$ -NMR 方法更推动了土壤腐殖质的研究进展<sup>[45-47]</sup>。Schulten 等通过 $^{13}\text{C}$ -NMR 数据和热解方法提出一个胡敏酸分子的化学结构模型,发现胡敏酸分子的核心结构是烷基芳香基<sup>[48]</sup>。Cook 等通过参差极化魔角样品自旋(CP-MAS) $^{13}\text{C}$ -NMR 技术分析了土壤中的腐殖质结构特征,得到了富里酸分子结构特征<sup>[49]</sup>。 $^{15}\text{N}$  和 $^1\text{H}$  核磁共振技术也在土壤腐殖质研究中被采用,但受到限制,应用并不广泛<sup>[50]</sup>。

## 2.3 核磁共振技术在农用化学品中的应用

核磁共振技术较早在我国农用化学品的分析研究中得到应用。最初该技术主要被用于分析化合物分子结构,为分析、研究、合成高效的化学农药发挥了巨大作用。在含磷、含氟农药残留的分析中,采用 $^{31}\text{P}$ -NMR、 $^{19}\text{F}$ -NMR 可以观察谱图中的峰数,来分辨不同含磷或含氟化合物组成的混合物<sup>[51]</sup>。有研究人员利用 $^{31}\text{P}$ -NMR 测定了谷物制品、面粉等食品<sup>[52]</sup>和蔬菜<sup>[53]</sup>中含磷农药的残留物。在农药杂质及其残留毒性的研究中,核磁共振技术具有独特的优点。研究人员可以利用核磁共振谱图的峰面积与相应质子数呈正比的关系,对化合物进行结构测定,对定量分析也有重要意义<sup>[54]</sup>。在定量分析时,也不须要引进任何校正因子或绘制工作曲线。在农药代谢物及其残留毒性和农药降解历程研究中,核磁共振技术也可以帮助得到产物信息<sup>[55-56]</sup>。

## 3 研究展望

随着社会经济不断发展,人们对生活品质的要求也日益提升,农产品质量安全及食品营养已经成为人们关注的重点,使得研究人员须要使用各种先进的分析测试手段来监测农业生产、消费的各个环节。联用技术的建立,拓展了核磁共振技术在农业中的应用。其中液相色谱和核磁共振联用技术(LC-NMR)及液相色谱质谱与核磁共振联用技术(LC-MS-NMR),可被成功用于鉴定植物中的化学成分<sup>[57]</sup>,有利于在特色农产品生产与研究方面作出贡献,使特色农产品特殊营养成分研究成为可能。

仪器制造水平不断提高,为核磁共振技术在农业生产及农产品分析检测中的应用前景提供了保证。目前商用的核磁共振仪比其他仪器更昂贵,在一定程度上限制了其推广运用。通过完善和提高核磁共振技术,不断开发仪器的新功能,降低仪器成本,必将进一步促进核磁共振技术在农业中的应用。

拓展新型检测领域,有利于不断解决生产生活的需求。有关农产品和食品的研究,走过很多历程,核磁共振技术因其特殊优点,有利于在该领域的研究和应用,尤其是对于稀有动植物的研究鉴别等方面。

核磁共振技术拥有无损、无辐射、安全高效等优点,完全有条件成为现代农业生产生活及农产品分析检测中强有力的手段之一,有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Shelton B. Some principles of NMR spectroscopy and their novel application[J]. Concepts in Magnetic Resonance, 1997(9): 83-93.
- [2] 周凝,刘宝林,王欣. 核磁共振技术在食品分析检测中的应用[J]. 食品工业科技, 2011, 32(1): 325-329.

- [3] 万娟, 陈中, 杨晓泉. 核磁共振技术及其在食品加工中的应用[J]. 食品与药品, 2006, 8(11): 17-19.
- [4] Hills B P, Wright K M, Gillies D G. A low-field, low-cost Halbach magnet array for open-access NMR[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2005, 175(2): 336-339.
- [5] 陈卫江, 林向阳, 阮榕生, 等. 核磁共振技术无损快速评价食品水分的研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(4): 125-127.
- [6] 邵小龙, 李云飞. 用低场核磁研究烫漂对甜玉米水分分布和状态影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 302-306.
- [7] Bertram H C, Schafer A, Rosenfold K, et al. Physical changes of significance for early post mortem water distribution in porcine *M. longissimus*[J]. Meat Science, 2004, 66(4): 915-924.
- [8] 李资玲, 刘成梅, 万婕, 等. 核磁共振研究膳食纤维面包制作过程中的水分迁移行为[J]. 食品科学, 2007, 28(10): 127-130.
- [9] 马斌. 运用 NMR 技术对冷冻食品中非冻结水分分布情况的研究[J]. 中外食品加工技术, 2003(2): 36.
- [10] 阿普尔怀特 T H. 油脂化学与工艺学[M]. 4 版. 秦洪万, 厉秋岳, 锡怡, 译. 北京: 轻工业出版社, 1991.
- [11] 钦理力. 核磁共振仪在油脂及油料分析中的应用[J]. 西部粮油科技, 2000, 25(1): 44-45.
- [12] 国际标准化组织. ISO 10632—2000 油料饼粕油和水分含量的同步测定 脉冲核磁共振光谱法[S]. 2000.
- [13] Toussaint C A, Medale F, Davenel A. Determination of the lipid content in fish muscle by a self-calibrated NMR relaxometry method: comparison with classical chemical extraction methods[J]. J Agric Food Sci, 2002, 82(2): 173-178.
- [14] Vanlent K, Vanlerberghe B, van Oostveldt P, et al. Determination of water droplet size distribution in butter: pulsed field gradient NMR in comparison with confocal scanning laser microscopy[J]. International Dairy Journal, 2008, 18(1): 12-22.
- [15] 朱旭东, 尤海丹, 赵海波. 核磁法测定油脚残油率的研究[J]. 农业科技与装备, 2008(3): 101-102.
- [16] 卢穹宇, 姬胜利. 核磁共振技术在糖类结构解析中的应用[J]. 中国生化药物杂志, 2008, 29(3): 207-209.
- [17] 祝耀初, 丁绍东, 陶冠军. 食品科学中核磁共振技术的应用(续)[J]. 食品与发酵工业, 1994(2): 57-62.
- [18] Blundell C D, Reed M A, Overduin M, et al. NMR spectra of oligosaccharides at ultra-high field (900 MHz) have better resolution than expected due to favourable molecular tumbling[J]. Carbohydrate Research, 2006, 341(12): 1985-1991.
- [19] 施蕴瀚, 吴季辉. 核磁共振波谱研究蛋白质三维结构及功能[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(8): 941-949.
- [20] Niccolai N, Spadaccin R, Scarselli M, et al. Probing the surface of a sweet protein: NMR study of MNEI with a paramagnetic probe[J]. Protein Science, 2001, 10(8): 1498-1507.
- [21] Alberti E, Humpfer E, Spraul M, et al. A high resolution  $^1\text{H}$  magic angle spinning NMR study of a high- $M_r$  subunit of wheat glutenin[J]. Biopolymers, 2001, 58(1): 33-45.
- [22] 刘兴前, 胡娟, 苏甫, 等.  $^1\text{H}$ -NMR 技术在氨基酸分析和 ATM 降解产物检测中的应用[J]. 西南国防医药, 2002, 12(3): 247-248.
- [23] 黄东雨, 黄雪莲, 卢雪花, 等. 核磁共振技术在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(11): 220-223.
- [24] 吴磊, 何小维, 黄强, 等. 核磁共振(NMR)技术在淀粉研究中的应用[J]. 食品工业科技, 2008, 29(4): 317-320.
- [25] Vodovotz Y, Dickinson L C, Chinachoti P. Molecular characterization around a glassy transition of starch using  $^1\text{H}$  cross-relaxation nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(10): 4948-4954.
- [26] Tananuwoong K, Reid D S. DSC and NMR relaxation studies of starch-water interactions during gelatinization[J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 58(3): 345-358.
- [27] Cornillon P, Salim L C. Characterization of water mobility and distribution in low- and intermediate-moisture food systems[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2000, 18(3): 335-341.
- [28] Roos Y H, Karel M, Kokini J L. Glass transitions in low moisture and frozen foods: effects on shelf life and quality[J]. Food Technology, 1996, 50(11): 95-108.
- [29] Chirife J, Buera M P. Water activity, glass transition and microbial stability in concentrated/semimoist food systems[J]. Journal of Food Science, 1994, 59(5): 921-927.
- [30] 钱菲, 张锦胜, 金志强, 等. 核磁共振技术对食品玻璃化及玻璃化转变温度的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(8): 666-669.
- [31] 林向阳. 核磁共振及成像技术在面包制品加工与储藏过程中的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2006.
- [32] Ronaldo N P, Guilherme A M R. Nuclear magnetic resonance and water activity in measuring the water mobility in pintado fish (*Pseudoplatystoma corruscans*) [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 58(1): 59-66.
- [33] 齐银霞, 成坚, 王琴. 核磁共振技术在食品检测方面的应用[J]. 食品与机械, 2008, 24(6): 117-120.
- [34] Clark C J, Macfall J S, Bielekir R L, et al. Amelioration of water core in Fuji apple viewed by two- and three dimensional nuclear magnetic resonance imaging[C]. Taupo: Proc Postharvest '96, 1998: 76.
- [35] Chaghule R S, Mlal P C, Patti R S, et al. Magnetic resonance spectroscopy study of sapota fruits at various growth stages[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002(3): 185-190.
- [36] Ishida N, Kobayashi T, Koizumi M, et al.  $^1\text{H}$  NMR imaging of tomato fruits[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1989, 53(9): 2363-2367.
- [37] Chen P, McCarthy M J, Kauten R. NMR for internal quality evaluation of fruits and vegetables[J]. Trans of the ASAE, 1989, 32(5): 1747-1753.
- [38] Andreotti G, Trivellone E, Lamanna R, et al. Milk identification of different species:  $^{13}\text{C}$ -NMR spectroscopy of triacylglycerols from cows and buffaloes' milks[J]. Journal of Dairy Science, 2000, 83(11): 2432-2437.
- [39] 王乐, 黎勇, 胡建华. 核磁共振法鉴别食用植物油掺伪餐饮业废油脂[J]. 中国油脂, 2008, 33(10): 75-77.
- [40] 刘海臣. 物探方法在辽西贫水农村山区的应用效果[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(12): 169-170.
- [41] 姬广柱, 周强, 侯国强. 综合多种物探方法在贫水山区找水的实践[J]. 地下水, 2001, 23(4): 208-210.
- [42] 万乐, 潘玉玲. 利用核磁共振方法探查岩溶水[J]. CT 理论与应用研究, 1999, 8(3): 15-19.
- [43] 潘玉玲, 张昌达. 地面核磁共振找水理论和方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000: 19-22.
- [44] 梁重山, 刘丛强, 党志. 现代分析技术在土壤腐殖质研究中的应用[J]. 土壤, 2001, 33(3): 154-158.