

# 利用低场核磁共振及其成像技术分析水稻浸种过程水分传递

宋 平<sup>1,2,3,4</sup>, 徐 静<sup>1</sup>, 马贺男<sup>5</sup>, 王 成<sup>2,3,4</sup>, 杨 涛<sup>1\*</sup>, 李 娜<sup>1</sup>

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097;  
3. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097; 4. 农业智能装备技术北京市重点实验室, 北京 100097;  
5. 中国刑事警察学院网络犯罪侦查系, 沈阳 110854)

**摘 要:** 为研究水稻种子浸种过程中内部水分流动情况, 可视化内部水分传递过程, 利用低场核磁共振及其成像技术, 监测沈农 9816 号、七山占及秀子糯 3 个品种水稻种子 48 h 浸种过程。每 6 h 时间间隔利用自旋回波 (spin echo, SE) 脉冲序列获取样品的质子密度加权像, 利用硬脉冲自旋回波 (carr-purcell-meiboomgill sequence, CPMG) 序列获取样品的横向弛豫时间  $T_2$  反演谱, 从而分析浸种过程对水稻种子内部水分分布的影响。试验结果表明: 核磁共振是一种有效的水分检测技术, 可以实现浸种过程中种子内部水分的快速、准确、无损的检测。利用水稻种子的质子密度加权像, 能够直观检测到种子内部水分分布情况, 动态的监测到种子内部水分流动过程, 分析发现水分最初是从胚进入种子内部, 继而通过种皮的渗透, 最后到达胚乳部分。根据  $T_2$  反演谱信号幅值计算得到的水稻种子吸水率, 发现 3 个品种在相同浸种时间的各个监测点均反映出秀子糯吸水率最高, 沈农 9816 号吸水率最低, 试验结果验证了支链淀粉的吸水性优于直链淀粉。研究结果可以为水稻种子浸种过程中水分传递的理论模型构建提供数据支持。

**关键词:** 水分; 核磁共振; 种子; 质子密度加权像; 伪彩图; 浸种; 水分传递;  $T_2$  反演谱

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.036

中图分类号: S351.5<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0274-07

宋 平, 徐 静, 马贺男, 王 成, 杨 涛, 李 娜. 利用低场核磁共振及其成像技术分析水稻浸种过程水分传递[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 274—280. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.036 <http://www.tcsae.org>  
Song Ping, Xu Jing, Ma He'nan, Wang Cheng, Yang Tao, Li Na. Analysis on moisture transport in process of rice soaking using low field nuclear magnetic resonance and its imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 274 — 280. (in Chinese with English abstract) doi : 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.036 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

水分是种子细胞内部新陈代谢的重要介质, 种子的物理性质变化与生理生化过程都与水分的状态和含量密切相关<sup>[1-2]</sup>。浸种过程可以软化种子表皮, 提高种子吸水速度, 促进种子的萌发。了解水稻浸种过程中内部的水分传递过程, 对合理选择浸种方法, 提高浸种质量具有重要的意义。目前对种子的水分检测方法一般有直接和间接 2 大类, 其中烘干减质量、蒸馏蒸出水分及化学溶剂测定几种直接检测方法, 具有耗时长、检测结果精度不高、破坏试验样本等缺点。电阻式速测法、电容式速测法及微波式速测法这几种间接检测方法具有快速、方便等特性, 但其应用宽度范围不足<sup>[3]</sup>。

低场核磁共振 (low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 作为一种新兴的分析检测手段, 以其快速、准确、无损等诸多优点现阶段在石油能源、生命科学、食品农业、高分子材料等诸多领域被广泛的研究与应用<sup>[4-8]</sup>。利用核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 技术及核磁共振波谱分析 (magnetic resonance spectroscopy, MRS) 技术, 可以实现样品内部水分分布信息的获取及水分流动的可视化观测。国内的一些学者将该项技术应用于果蔬内部的品质检测、面粉制品的水分迁移过程研究<sup>[9-13]</sup>; Ghosh P K 等<sup>[14]</sup>利用低场核磁共振成像技术获取了小麦种子干燥过程中的水分分布; 徐建国等<sup>[15]</sup>利用低场核磁共振成像技术分析了胡萝卜干燥过程中的水分传递; Frias J M<sup>[16]</sup>等利用高场核磁共振成像技术获得了水稻在干燥过程中的水分轮廓信息。利用低场核磁共振及其成像技术对水稻浸种过程的种子内部水分研究未见相关报道。

本文以沈农 9816 号、七山占及秀子糯 3 个品种水稻种子为研究对象, 利用低场核磁共振成像系统获取水稻种子在 48 h 浸种过程中的质子密度加权像, 实现了水稻种子内部水分动态分布变化及流动过程的可视化研究。利用低场核磁共振波谱分析系统获取  $T_2$  反演谱, 根据核磁共振信号幅值计算水稻浸种过程中种子的吸水率, 从而分析水稻种子吸水情况变化规律, 为水稻种子浸种过

收稿日期: 2015-11-18 修订日期: 2016-07-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划): 作物生产智能监控关键技术与系统研究 (2012AA10A503); 国家重大科学仪器设备开发专项“便携式植物微动态离子流检测设备研发与应用” (2011YQ080052); 公益性行业 (农业) 科研专项“作物育种材料农艺性状信息高通量获取与辅助筛选技术” (201203026)。

作者简介: 宋 平, 博士生, 副教授, 从事精准农业方面的研究。沈阳 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 110866。Email: songping\_1010@163.com  
\*通信作者: 杨 涛, 博士, 教授, 主要从事计算机技术在农业领域应用的教学与研究工作。沈阳 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 110866。

Email: 328748306@qq.com

程中的水分传递理论模型构建提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设备

NMI20-015V-I 核磁共振仪 (磁场强度:  $(0.5 \pm 0.08)$  T, 射频脉冲频率: 18 MHz; 磁体温度: 32 °C; 探头线圈直径: 5 mm; 上海纽迈电子科技有限公司); 玻璃试管 (直径: 4.5 mm); 玻璃培养皿 3 个; 温度计; 吸水纸若干。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 样品制备

试验采用的水稻种子取自沈阳农业大学水稻研究所, 种子年份为 2014 年, 品种为沈农 9816 号、七山占及秀子糯。每个品种各选择 1 粒成熟饱满的水稻种子作为试验样本, 对应的样品编号分别为 A、B、C, 将其垂直装入 4.5 mm 口径的玻璃试管并放置于核磁共振仪中心位置进行检测, 获取浸种前样本的质子密度加权像及  $T_2$  反演谱。

将采样后的 3 个试验样本置于装有清水的玻璃培养皿中进行浸种处理, 浸种温度恒定为  $(25 \pm 1)$  °C。分别于 6、12、18、24、30、36、42、48 h 取出试验样本, 用吸水纸吸干表面水分, 再将其垂直装入玻璃试管并放置核磁共振仪中心位置进行检测, 获取浸种后各监测点样本的质子密度加权像及  $T_2$  反演谱。

#### 1.2.2 核磁共振技术

核磁共振波谱分析和核磁共振成像是核磁共振技术的 2 个重要的学科分支。前者的基本原理是利用由核磁共振信号经由傅立叶公式转换得到的频率信号 (即波谱信号) 作为定量分析检测的方法, 后者的基本原理是利用处于特殊磁场中的具有自旋特性的氢原子核在接收无线电射频脉冲激发后, 在停止射频脉冲进行释放过程能量中, 氢原子释放的核磁共振信号被外接收器所获取, 并经电子计算机处理而得到图像<sup>[17]</sup>。

#### 1.2.3 核磁共振成像

MRI 图像上每点信号强度  $I$  用如下公式描述:  $I \propto S[1 - \exp(-TR/T_1)] \cdot \exp(-TE/T_2)$ , 其中  $I$  表示信号强度;  $S$  表示质子密度;  $TR$  表示重复时间, ms;  $T_1$  表示纵向弛豫时间, ms;  $TE$  表示回波时间, ms;  $T_2$  表示横向弛豫时间, ms。

$T_1$  加权像 ( $T_1$  weighted image,  $T_1W_1$ ) 主要反映的是组织间  $T_1$  值差别, 会抑制部分自由水的信号;  $T_2$  加权像 ( $T_2$  weighted image,  $T_2W_1$ ) 主要反映的是组织间  $T_2$  值差别, 会抑制部分结合水的信号; 质子密度加权像 (proton density weighted image, PDWI) 主要反映的是组织间质子密度弛豫时的差别, 图像中组织质子密度相差不大, 对比度不强, 但有较高的信噪比, 可用于观察细小的组织结构。前期试验研究结果表明, 水稻在浸种过程中种子内部存在自由水与结合水 2 种相态水分, 且水分在 2 种状态之间不断的相互转化<sup>[18]</sup>。所以试验选择质子密度加权像做成像处理, 选取长  $TR$  和短  $TE$ , 减少纵向弛豫时间  $T_1$  和横向弛豫时间  $T_2$  对图像影响, 此时信号强度只

与样品组织质子密度有关, 这样可以保证没有抑制掉任何相态水分信号。

试验利用标准油样进行预扫描, 寻找磁场中心频率及磁场脉冲宽度, 利用 SE 脉冲序列获得样本质子密度加权像。成像的主要参数设置为: 主频  $SF01=18.3971$  MHz, 90°射频脉宽  $RFA90=4.0$ , 180°射频脉宽  $RAF180=6.4$ , 重复时间  $TR=140$ ; 回波时间  $TE=5.885$ 。设定层数  $silces=1$ , 选层宽度  $slice\ width=20mm$ , 选层厚度  $slice\ Gap=2mm$ 。试验样品本垂直于玻璃试管放置, 采集样本冠状面 (coronal) 图像, 获取水稻种子纵向剖面信息。

#### 1.2.4 核磁共振波谱分析系统

核磁共振波谱分析软件中硬脉冲回波 (carr-purcell-meiboom-gill sequence, CPMG) 序列参数是根据的硬脉冲自由感应衰减 (free induction decay, FID) 序列寻找的中心频率及硬脉冲脉宽设定的。

CPMG 脉冲序列的参数设置为: 主频  $SF1=18$  MHz, 偏移频率  $O1=397.157$  kHz, 90°脉冲射频脉宽  $P1=5\ \mu s$ , 180°脉冲射频脉宽  $P2=12\ \mu s$ , 回波个数  $NECH=500$ , 信号采样点数  $TD=17524$ , 重复采样次数  $NS=64$ , 重复采样等待时间  $TW=5\ 000$  ms, 重复采集 3 次获取测定样品的  $T_2$  弛豫时间。

### 1.3 图像及数据处理

将核磁共振成像软件采集到的 256 pixel×256 pixel 的灰度图, 利用纽迈核磁共振图像处理软件进行统一灰度、伪彩图、滤波等处理, 以获得更适合观测的图像信息。

将核磁共振应用分析软件中重复 3 次采集生成的 CPMG 脉冲序列对应的时段信号值与峰值计算平均值, 并将平均值导入核磁共振反演软件进行反演运算得到  $T_2$  反演图谱。

将核磁共振成像软件中采集的所有监测点图像中各像素点的质子密度信号强度值,  $T_2$  反演谱信号总幅值, 2 组试验数据交由 SPSS20.0 软件进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻种子内部水分的可视化研究

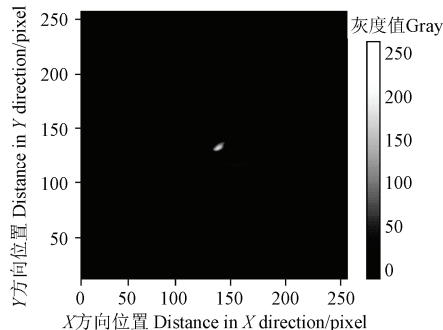
#### 2.1.1 基于质子密度加权像的水稻种子内部水分的可视化分析

核磁共振成像是一种无损检测的新方法, 能得到样品内部的质子密度加权像, 反映样品中氢质子的分布, 通常氢质子越密集的区域, 质子密度加权像越明亮。水稻种子内部, 氢质子主要来源于水分子, 质子密度加权像越明亮表明该区域水分含量越高, 因此可以通过观测质子密度加权像图像的灰度值, 来反映样品的水分含量<sup>[19-22]</sup>。

试验对 3 个品种水稻种子 48h 浸种过程每 6 h 时间间隔分别进行一次信号采集, 共采集得到 27 幅灰度图。所有图像均具有共同的特征, 此处选取其中一张图像进行详细分析。图 1 为沈农 9816 号水稻种子在 24 h 浸种时间采集到的 256 pixel×256 pixel 的灰度图。

试验中我们采用质子密度加权像作为成像方式, 这种方式下自由水与结合水的对比度不强, 无法通过图像的亮暗区分 2 种相态水分的分布, 但可以明确样品内部

水分整体情况。图中明亮的区域为水分，黑色部分为固态物质。图 1 中最亮的区域为胚，说明水是最先通过胚的半透膜结构自由的出入，从胚端进入到种子内部。图像中亮度相对较暗的区域为种皮，说明水分可以通过种皮渗透到种子内部。图像中最暗的区域为胚乳，说明胚乳的吸水能力最差。

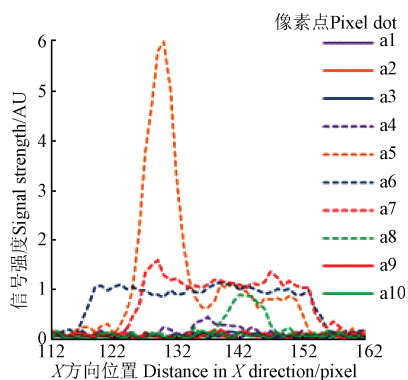


注：品种：沈农 9816 号；浸种时间：24 h；浸种温度：(25±1)℃。  
Note: Variety: Shennong NO.9816; Seed soaking time: 24 h; temperature: (25±1)℃.

图 1 水稻种子核磁共振冠状面质子密度加权像  
Fig.1 Proton density weighted image of rice seed

### 2.1.2 基于信号强度的水稻种子内部水分的可视化分析

图 2 是从原始的沈农 9816 号水稻种子 24 h 浸种时间的核磁共振图像中选取了 50 pixel×50 pixel 作为目标区域图像，提取了该区域中的像素点对应的信号强度值绘制的曲线图。此区域为 X 方向与 Y 方向核磁共振信号强度最大的信号区域，其中轴向图像 X 方向的起、止像素位置分别为 112、162 pixel，Y 方向的起、止像素位置分别为 139、189 pixel，该图 X 方向保留全部 50 pixel 的数据点，Y 方向每隔 5 个像素选取 1 个数据点共计 10 个像素点，得到如图 2 所示核磁共振信号强度变化曲线。



注：品种：沈农 9816 号；浸种时间：24 h；浸种温度：(25±1)℃；a1~a10 表示 X 方向位于 112-162，Y 方向位于 139、144、149、154、159、164、169、174、179、184 像素点位置曲线。  
Note: Variety: Shennong NO.9816; Seed soaking time: 24 h; temperature (25±1)℃; a1-a10 indicate the pixel position curve with the X direction locating in 112-162, Y direction locating at 139, 144, 149, 154, 159, 164, 169, 174, 179, 184.

图 2 水稻种子核磁共振图像信号强度

Fig.2 Signal intensity of magnetic resonance image of rice seed

核磁共振信号强度与样品中  $^1\text{H}$  核密度有关，采用 SE 脉冲序列获得的磁共振图像的像素信号强度与该像素点处的含水率、弛豫特性以及  $TE$ 、 $TR$  等参数设置有关<sup>[23-24]</sup>，

当  $TE$ 、 $TR$  等参数设置相同时，信号强度的大小即反应了样品该点的含水率，所以根据核磁共振信号强度变化曲线可以很好的表达样品某处的水分轮廓线。

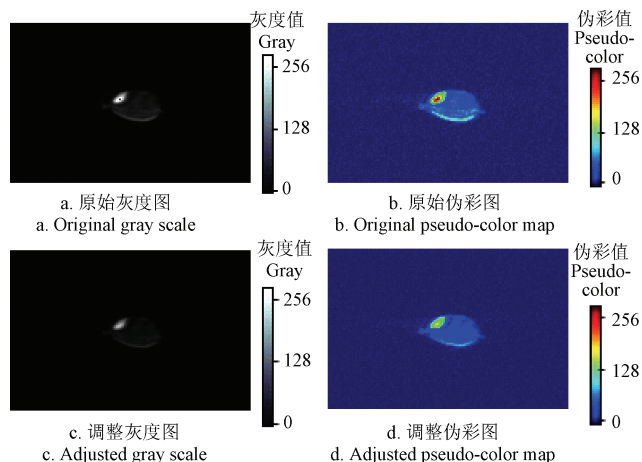
图 2 中 a1 信号轮廓线是图像中心像素区域 (Y 139 pixel) 处质子密度信号强度 ( $I$ ) 沿 X 方向分布图，a2 信号轮廓线是图像中心像素区域 (Y 144 pixel) 处质子密度信号强度 ( $I$ ) 沿 X 方向分布图，其余数据线依此类推。因为核磁共振信号对水分变化十分敏感，所以该图各曲线反映了该处水分轮廓线的径向分布和变化规律。

轮廓线与 X 轴所围的面积大小能表达该层所含水分的多少，图 2 中任意一条曲线沿 X 方向的信号强度值不唯一，说明此曲线表现的这一层面水分分布不均匀，根据此数据差异可以了解水稻种子同一物理层面不同位置含水率具有很大差异。图 2 中 a1、a2、a3、a9、a10 此 5 条实线曲线，信号强度无限接近于 X 轴，表示该曲线各像素点信号强度弱，说明曲线所在位置样品的含水率不，此信号区域为胚乳部分。a4、a6、a7、a8 此 4 条虚线曲线，曲线各像素点信号强度相对于其它实线曲线位置有大幅度提升，说明曲线所在位置样品的含水率较高，此信号区域为种皮部分。虚线曲线 a5 的信号量最大，表示曲线所在位置样品的含水率最高，说明该曲线所在区域为种子的胚。

### 2.2 浸种过程对水稻种子内部水分传递的影响

#### 2.2.1 不同预处理方法对模型结果的影响

为提取图像特征，从原始图像中选取图像中部 150 pixel×100 pixel 像素区作为感兴趣区域。核磁共振仪采集的质子密度加权像为灰度图，它是将不同颜色深浅或者不同亮度上的不同颜色的图像，显示为从最暗的黑色到最亮的白色的灰度图像。虽然它可以代表任何颜色、亮度、深浅，但将灰度图转化为彩色图，有助于提高人类视觉的辨别能力，从而可以更好的判断图像的细节部分。伪彩图获得的方式就是将黑白色或者各个级别的灰度级匹配到彩色空间的一点，从而将原有的单色图像转换为彩色图像，如图 3 所示。



注：品种：沈农 9816 号；浸种时间：24h；浸种温度：(25±1)℃。  
Note: Variety: Shennong NO.9816; Seed soaking time: 24h; temperature: (25±1)℃.

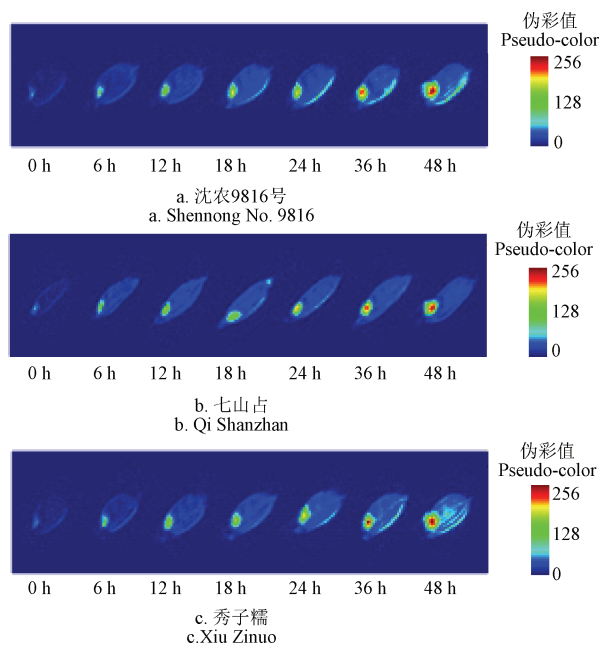
图 3 水稻种子核磁共振图像预处理

Fig.3 Nuclear magnetic resonance image preprocessing of rice seed

由于核磁共振成像软件得到的原始图像亮度并不是按照图像信号值来显示的,每一幅图中它的亮度的最大最小值都是一样的,这样得到的单幅图像足够清晰,但样品之间无法形成对比,此时需要对同一样本不同浸种时间采样点的全部图像利用组迈核磁共振图像处理软件进行统一映像处理,这样得到的一组图像具有同一灰度。再利用核磁共振图像处理软件对灰度图进行滤波和伪彩预处理,处理过程及其效果变化如图 3 所示。

### 2.2.2 不同浸种时间对试验结果的影响

图 4 为沈农 9816 号、七山占及秀子糯 3 个品种水稻种子,浸种时长分别为 0、6、12、18、24、36、48 h 的 7 个时间点的连续伪彩图。3 个品种水稻种子浸种时间 0 h 均表现出胚部图像的亮度高于种子的其他位置,说明浸种前水稻种子胚部的含水量已远远高于其他部位。此图验证了由不同亲水基因含量构成的不同种子部位,其部位含水量亦不相同。



注:品种:沈农 9816 号、七山占、秀子糯,浸种时间:0、6、12、18、24、36、48 h,浸种温度:(25±1)℃。  
Note: Variety: Shennong NO. 9816, Qi Shanzhan, Xiu zinuo, Seed soaking time: 0, 6, 12, 18, 24, 36, 48 h, Seed soaking temperature: (25±1)℃.

图 4 水稻种子核磁共振连续时间点伪彩图

Fig.4 NMR pseudo color map of rice seed at continuous time point

通过各浸种时间点浸种状况的连续伪彩图分析水分动态流动情况,发现水首先从胚端的特定部位(发芽孔)进入种子。随着浸种时间的延长,水从胚及其附近渗入并沿种皮表面迅速扩散,这是因为种皮具有特殊的构造和机能,比起其他部位来说,水分更容易透过。但沿表皮进入种子内部的水扩散速度比较慢,水分最后才到达胚乳区域。同时也发现水不仅从稻种胚端浸入种子,而且从顶端同样可以浸入种子,但从胚端进入种子的水分比从顶端浸入种子的水分要多很多。

通过各浸种时间点的浸种状况的伪彩图,观察水稻

种子外观形态变化。随着浸种时间的逐步延长,伪彩图中种子图像出现轻微扩大,说明种子吸水后逐步出现膨胀变化,此时的种子处于吸胀阶段。在 36 h 浸种时间点,3 组图像均反映出种子外观原本圆滑形态发生了突起改变,说明种子进入到破胸状态,此时种子内部原生质由凝胶状态转变为溶胶状态,种子酶的活性急剧增强,种子内部养分开始转化,从胚乳或子叶中分解、运输到胚根、胚芽中重建细胞,种子即将进入萌动阶段。而当浸种时间达到 48 h 时,图像状态改变更加明显,此时目测种子外观也能观测到种子胚根伸长均突破种皮,露出白色的芽,种子达到露白状态。如果继续浸泡种子,胚根将继续生长,胚根长度等于种子长度,胚芽长度等于种子一半时,种子将处于发芽状态,但此状态已经可以通过种子外观肉眼直接目测,故试验中未做成像处理。

### 2.3 浸种过程对水稻种子吸水率的影响

Choi 等的试验表明采用核磁共振技术得到的水分测定结果与重量法所测结果有很好的相关性<sup>[25]</sup>。大量试验证明,弛豫谱信号幅值与含水率之间具有的极显著线性关系<sup>[26-30]</sup>。通过前期试验已知,根据核磁共振信号总幅值可以估测水稻种子浸种过程中种子的吸水率<sup>[31-32]</sup>。所以此处利用反演谱中得到的所有核磁共振信号总幅值计算该时间点水稻种子的吸水率。

图 5 为沈农 9816 号、七山占及秀子糯水稻种子在 6、12、18、24、30、36、42、48 h 浸种过程中的种子的吸水率。通过此折线图,发现 3 个品种水稻种子在各个浸种时间点均表现为秀子糯的吸水率最高,七山占吸水率次之,沈农 9816 号吸水率最弱。这是由于不同品种的水稻,由于其组成成分不同吸水速度也不同,种子的吸水速度和饱和持水量有关,稻种饱和持水量高的品种其吸水速度相对也快。

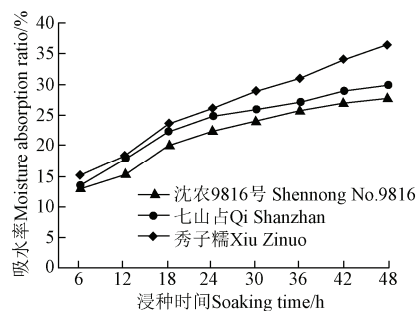


图 5 水稻种子不同浸种时间吸水率曲线

Fig.5 Water absorption curve in different soaking time of rice seed

已知,沈农 9816 号,粳稻、非糯稻,直链淀粉质量分数为 17.7%,蛋白质质量分数 8.4%,黏性弱。七山占,籼型常规水稻,直链淀粉质量分数 24%。秀子糯,粳稻、糯稻,其支链淀粉质量分数接近 100%,黏性高。这里根据水稻品种及其淀粉含量构成表 1。希望根据分析各品种水稻种子成分中淀粉含量的差异来分析其吸水率的差异。

因为支链淀粉颗粒大,晶体结构不太紧密,水分子容易渗透到支链淀粉颗粒内,使淀粉颗粒润湿涨大。而

直链淀粉颗粒中, 排列有序的大分子链使水分子不容易渗透到淀粉颗粒内部, 大量水分子一般作用于直链淀粉颗粒的表面, 故支链淀粉水溶性优于直链淀粉<sup>[1-2]</sup>。

表 1 水稻种子种类及其淀粉质量分数  
Table 1 Type and starch content of rice seed

品种 Variety	类别 Classes		直链淀粉 Amylose/%	支链淀粉 Amylopectin/%
沈农 9816 号	粳稻	非糯稻	17.7	82.3
七山占	籼稻	非糯稻	24	76
秀子糯	粳稻	糯稻		近 100

试验选取的 3 个水稻品种, 分别为粳稻、籼稻及糯稻, 各品种的支链淀粉与直链淀粉含量的差异, 使各品种的亲水性有很大的不同, 核磁共振检测的结果也很好的验证了支链淀粉水溶性优于直链淀粉这一结论。本文仅就淀粉含量这单一因素的差异分析了水稻种子吸水性的差异, 水稻种子成分中蛋白质的亲水性优于淀粉, 由于各品种水稻种子蛋白质含量尚不明确, 故文中未作具体分析, 待进一步试验分析验证。

### 3 结 论

1) 低场核磁共振技术利用  $T_2$  弛豫谱和质子密度加权像获取样品内部氢质子密度与分布, 从而反映样品的水分含量和水分流动信息, 试验提供了一种的快速、准确、无损的水分检测方法。

2) 试验通过质子密度图像的亮、暗区域实现对水稻浸种过程内部水分变化的描述, 质子密度加权的亮度越高说明氢质子越密集, 样品的水分含量越高。通过观察 3 个水稻品种 48 h 浸种时间各个取样点的灰度图及其信号强度曲线, 发现胚的水分含量最高, 其次为种皮, 最低的区域为胚乳。

3) 通过顺序观测 3 个水稻品种 48 h 浸种时间各取样点的核磁共振伪彩图, 发现水分最早是从胚进入到种子内部, 然后通过种皮的特殊构造膜进行渗透, 最后到达种子胚乳部分。种子部位不同, 亲水基因不同, 其水分含量也不同。

4) 3 个水稻品种在 48 h 浸种时间内, 均表现为秀子糯的吸水率最高, 沈农 9816 号的吸水率最差, 这是由于样本支链淀粉及直链淀粉含量不同造成的, 试验表明支链淀粉含量越高水稻种子的吸水性越强, 核磁共振的检测结果很好的验证了这一结论。

### 【参 考 文 献】

[1] 张红生, 胡晋. 种子学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
[2] 颜启传. 种子学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.  
[3] 胡晋, 李永平, 苏菊萍, 等. 种子水分测定的原理和方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.  
[4] 张建锋, 何勇, 龚向阳, 等. 基于核磁共振成像技术的香梨褐变检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 169—173. Zhang Jianfeng, He Yong, Gong Xiangyang, et al. Browning detection of fragrant pear using magnetic resonance imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for

Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 169—153. (in Chinese with English abstract)

- [5] 周水琴, 商德胜, 应义斌. 基于核磁共振成像的水果轻微损伤识别[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 107—110. Zhou Shuiqin, Shang Desheng, Ying Yibin. Detecting subtle bruises on fruits with nuclear magnetic resonance imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 107—110. (in Chinese with English abstract)
- [6] 尹升华, 薛振林, 吴爱祥, 等. 基于核磁共振成像技术的堆浸细观渗流速度场特征[J]. 工程科学学报, 2015, 37(3): 275—280. Yin Shenghua, Xu Zhenlin, Wu Aixiang, et al. Mesoscopic seepage velocity characteristics during heap leaching based on magnetic resonance imaging[J]. Journal of Engineering Science, 2015, 37(3): 275—280. (in Chinese with English abstract)
- [7] Gonzalez J J, Valle R C, Bobroff S, et al. Detection and monitoring of internal browning development in 'Fuji' apples using MRI[J]. Postharvest Biology & Technology, 2001, 22(2): 179—188.
- [8] Barreiro P, Zheng C, Sun D W, et al. Non-destructive seed detection in mandarins: comparison of automatic threshold methods in flash and compira MRIs[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 47(2): 189—198.
- [9] Taglienti A, Massantini R, Botondi R, et al. Postharvest structural changes of hayward kiwifruit by means of magnetic resonance imaging spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2009, 114(4): 1583—1589.
- [10] Ran Z, Yunfei L. Texture analysis of MR image for predicting the firmness of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) during storage using an artificial neural network[J]. Magnetic Resonance Imaging, 2007, 25(5): 727—732.
- [11] 周然, 闫丽萍, 谢晶, 等. 可食性保鲜涂膜对冷藏黄花梨品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 275—279. Zhou Ran, Yan Liping, Xie Jing, et al. Effects of edible coatings on postharvest qualities of Huanghua pear fruits during cold storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(5): 275—279. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈卫江, 林向阳, 阮裕生, 等. 核磁共振及其成像技术研究面粉吸水率及其形成过程[J]. 食品科学, 2006, 27(11): 124—129. Chen Weijiang, Lin Xiangyang, Ruan Rongsheng, et al. Study on the absorbability and formation of flour with NMR and MRI techniques[J]. Food Scienc, 2006, 27(11): 124—129. (in Chinese with English abstract)
- [13] 周水琴, 应义斌, 商德胜. 基于形态学的香梨褐变核磁共振成像无损检测[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(12): 2141—2145.

- Zhou Shuiqin, Ying Yibin, Shang Desheng. Morphology based noninvasive detection for fragrant pears browning with magnetic resonance imaging[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(12): 2141—2145. (in Chinese with English abstract)
- [14] Ghosh P K, Jayas D S, Gruwel M L H, et al. A magnetic resonance imaging study of wheat drying kinetics[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 189—199.
- [15] 徐建国, 徐刚, 张绪坤, 等. 利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 271—276.
- Xu Jianguo, Xu Gang, Zhang Xukun, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 271—276. (in Chinese with English abstract)
- [16] Frías J M, Foucat L, Bimbenet J J, et al. Modeling of moisture profiles in paddy rice during drying mapped with magnetic resonance imaging[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86(1): 173—178.
- [17] 张建锋, 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 Jangfeng, Wu Di, Gong Xiangyang, 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. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宋平, 杨涛, 王成, 等. 利用低场核磁共振分析水稻种子浸泡过程中的水分变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 279—284.
- Song Ping, Yang Tao, Wang Cheng, et al. Analysis of moisture changes during rice seed soaking process using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 279—284. (in Chinese with English abstract)
- [19] Thybo A K, Andersen H J, Karlsson A H, et al. Low-field NMR relaxation and NMR-imaging as tools in differentiation between potato sample and determination of dry matter content in potatoes[J]. LWT - Food Science and Technology, 2003, 36(2): 315—322.
- [20] Zhang L, McCarthy M J. Black heart characterization and detection in pomegranate using NMR relaxometry and MR imaging[J]. Postharvest Biology & Technology, 2012, 67(5): 96—101.
- [21] Yang H, Ding L, An L, et al. A d-f heteronuclear complex for dual-mode phosphorescence and magnetic resonance imaging[J]. Biomaterials, 2012, 33(33): 8591—8599.
- [22] Ruan R, Litchfield J B, Eckhoff S R. Simultaneous and nondestructive measurement of transient moisture profiles and structural changes in corn kernels during steeping using microscopic nuclear magnetic resonance imaging[J]. Cereal Chemistry, 1992, 69(1): 13—17.
- [23] Callaghan P T, Clark C J, Forde L C. Use of static and dynamic NMR microscopy to investigate the origins of contrast in images of biological tissues[J]. Biophysical Chemistry, 1994, 50(1/2): 225—235.
- [24] Duce S L, Carpenter T A, Hall L D, et al. An investigation of the origins of contrast in NMR spin echo images of plant tissue[J]. Magnetic Resonance Imaging, 1992, 10(2): 289—297.
- [25] Choi S G, Kerr W L. <sup>1</sup>H NMR studies of molecular mobility in wheat starch[J]. Food Research International, 2003, 36(4): 341—348.
- [26] Chen F L, Wei Y M, Zhang B. Characterization of water state and distribution in textured soybean protein using DSC and NMR[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 522—526.
- [27] Van A H. Intact plant MRI for the study of cell water relations, membrane permeability, cell-to-cell and long distance water transport[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4): 743—756.
- [28] Ishida N, Koizumi M, Kano H. The NMR Microscope: a unique and promising tool for plant science[J]. Annals of Botany, 2000, 86(2): 259—278.
- [29] Fabri D, Williams M A K, Halstead T K. Water T<sub>2</sub> relaxation in sugar solutions[J]. Carbohydrate Research, 2005, 340(5): 889—905.
- [30] Aroulmoji V, Mathlouthi M, Feruglio L, et al. Hydration properties and proton exchange in aqueous sugar solutions studied by time domain nuclear magnetic resonance[J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1644—1650.
- [31] 宋平, 徐静, 马贺男, 等. 用低场核磁共振检测水稻浸种过程中种子水分的相态及分布特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 204—210.
- Song Ping, Xu Jing, Ma Henan, et al. Moisture phase state and distribution characteristics of seed during rice seed soaking process by low field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 204—210. (in Chinese with English abstract)
- [32] 宋平, 杨涛, 王成, 等. 用核磁共振研究浸种方法对水稻种子吸水量的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 237—243.
- Song Ping, Yang Tao, Wang Cheng, et al. Effects of rice seed soaking methods on moisture absorption capacity by low-field nuclear magnetic resonance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(7): 237—243. (in English with Chinese abstract)

## Analysis on moisture transport in process of rice soaking using low field nuclear magnetic resonance and its imaging

Song Ping<sup>1,2,3,4</sup>, Xu Jing<sup>1</sup>, Ma He'nan<sup>5</sup>, Wang Cheng<sup>2,3,4</sup>, Yang Tao<sup>1\*</sup>, Li Na<sup>1</sup>

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. National Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China;

3. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China;

4. Beijing Key Laboratory of Intelligent Equipment Technology for Agriculture, Beijing 100097, China;

5. Network Crime Investigation Department, National Police University of China, Shenyang, 110854, China)

**Abstract:** In order to study the internal water flow process of rice seed in presoaking and visualize the internal water transport process, an experiment of monitoring three varieties of rice seeds, namely SYAU No. 9816, Qi-shan-zhan, and Xiu-zi-nuo, during a 48h presoaking process with TD-NMR and MRI technology has been conducted. To learn the effect of the presoaking process on rice seed water distribution and water absorption, during the experiment period, the PDWIs of all samples have been obtained with SE pulse sequence, and the T2 spectral deconvolution images have been obtained with the CPMG pulse sequence every 6 hours. During the observation period, after presoaking for 0 hour, 6 hours, 12 hours, 18 hours, 24 hours, 30 hours, 36 hours, 48 hours, spin-echo (spin echo, SE) pulse sequence had been used to obtain proton density-weighted images of all the samples. CPMG (carr-purcell-meiboomgill sequence, CPMG) sequence had been used to obtain the transverse relaxation time T2 inversion spectrum of all the samples, so as to analyze the impact of seed soaking of the internal water distribution of rice seeds. NIUMAG MRI image processing software had been used on the 256 pixel  $\times$  256 pixel grayscale images acquired by the magnetic resonance imaging software for unified grayscale, pseudo color images, filtering and other processing, to adapt the images into forms that were more suitable for observation. The average value of the 3 CPMG pulse sequence value generated by the analysis software after repeated application of NMR signal at different corresponding time and the peak value had been calculated and the average value had been imported into NMR inversion software to obtain T2 spectral deconvolution. The experiment results showed that: MRI is an effective water detection technology, with whose help the internal water of rice seeds during presoaking can be monitored efficiently, accurately, without any loss. The use of T2 relaxation spectrum and proton density-weighted images helped to obtain a sample of internal hydrogen proton density and distribution, so as to reflect the moisture content and water flow information of the sample. PDWI can show the distribution of hydrogen proton within the samples. As in a PDWI, the part will be brighter if the density of hydrogen proton in that part is higher and the hydrogen protons within rice seeds mainly come from water, the brighter the part of the image is the higher level of water content in that part of the seeds it is. Therefore, with PDWI, the internal water distribution of rice seeds can be detected and explicitly shown. By observing the grayscale and the signal intensity curve of the three different kinds of rice after 48-hour presoaking time at various sampling points, the results found embryos had the highest moisture content, the seed coat came second, and endosperm had the lowest moisture content. A serial of pseudo-color maps of rice seeds obtained every 6 hours during presoaking can manifest the internal water dynamic flow process within the seeds. The map analysis showed that the water first penetrated the semi-permeable membrane of the embryos, went inside of the seed from the embryo end, penetrated the seed coat into the seed, and finally reached the endosperm. According to the T2 spectral deconvolution signal amplitude spectrum, water absorption of the rice seeds can be calculated. After each period of presoaking at various monitoring points, Xiu-zi-nuo showed the highest level of water absorption, Qi-shan-zhan came the next, and SYAU No. 9816 had the lowest level of water absorption. The paper analyzed the causes of the difference in water absorption: amylopectin has better water absorption than amylase, and Xiu-zi-nuo has the highest amylopectin content within the three different seed types, while SYAU No. 9816 has the highest amylose content. This conclusion was perfectly verified by the MRI results. The experiment results may provide valuable data for the module construction of water transport theory during rice seed presoaking.

**Keywords:** moisture; nuclear magnetic resonance (NMR); seed; proton density weighted image; pseudo-color map; presoaking; water transport;  $T_2$  spectral deconvolution