

小麦叶片衰老态势核磁共振分析*

杜光源¹ 唐燕² 张嵩午¹ 王长发³ 郭嵩光²

(1. 西北农林科技大学理学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100;

3. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 建立了小麦的核磁共振活体检测体系,通过监测小麦叶片的 T_2 弛豫特性、含水率以及叶绿素含量在灌浆中后期的日序变化,发现从叶片衰老初期至降解期, T_2 弛豫谱幅度和含水率变化不明显,平均 T_2 弛豫时间持续增大,而叶绿素含量逐渐减小;到叶片衰亡期, T_2 弛豫谱幅度、含水率、平均 T_2 弛豫时间以及叶绿素含量均迅速减小至最小值。由此可见,小麦叶片的 T_2 弛豫谱幅度与含水率具有正相关关系,而平均 T_2 弛豫时间与生理活性有关。最后根据叶片的 T_2 弛豫特性,分析了核磁共振 T_2 弛豫谱、磁共振 T_1 加权成像以及 T_2 加权成像等方法在评价小麦叶片衰老态势方面的特点。

关键词: 小麦叶片 衰老 核磁共振 T_2 弛豫时间 磁共振成像

中图分类号: S121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0264-07

引言

小麦灌浆期叶片的持绿功能期对籽粒产量具有重要意义,是小麦育种专家极为重视的表型特征^[1-3]。目前小麦叶片衰老态势主要通过叶色、绿叶相对面积以及叶绿素荧光等方法来评价^[4]。前两种方法受观测者的主观感受影响,后者则受太阳辐射等因素影响,且叶室夹具容易对叶片造成损伤。低场核磁共振以¹H为探针,可用于探测植物水分生理状态。比如植物叶片的核磁共振 T_2 弛豫特性(NMR T_2 Relaxivity)与含水率、水分分布、蒸腾活性以及水势等密切相关^[5]。与其他技术相比,核磁共振技术具有检测快速、检测方式多样、无损和非接触等优点。

核磁共振 T_2 弛豫谱给出 T_2 弛豫时间(T_2 relaxation time)及其对应的幅度(Amplitude, A),其中 T_2 弛豫时间反映了水分子的动力学特性,与水分所在微区大小和结构、水溶性糖含量以及生物膜透水率等因素有关,幅度对应于含水率^[6-7]。植物叶片的衰老过程包括:叶绿素的降解和叶绿体内膜系统的退化,亚细胞器的降解,直至细胞快速脱水衰亡^[8]。该过程在叶片的 T_2 弛豫谱上的体现可能包括两个方面:一方面,细胞脱水将导致 T_2 弛豫谱幅度的降低;另一方面,膜系统退化和亚细胞器的

降解改变了水分的微区分布,从而导致 T_2 弛豫时间的变化。但是 T_2 弛豫时间将发生何种变化仍然未知。另外,叶片衰老态势也将因为其弛豫特性和水分状态特征反映在磁共振图像上^[9]。与核磁共振 T_2 弛豫谱解析检测区总体含水率不同的是,磁共振成像给出水分的组织分布。本文利用核磁共振 T_2 弛豫谱技术和磁共振成像技术,建立小麦植株的核磁共振活体检测系统,研究小麦叶片含水率、叶绿素含量与核磁共振 T_2 弛豫谱的关系,并在此基础上评价核磁共振 T_2 弛豫谱和磁共振成像技术反映叶片衰老态势的有效性。

1 材料与方 法

1.1 实验设计

选择主栽小麦品种陕229为实验材料。实验材料种植于西北农林科技大学农作试验站,地处中国小麦主产区,属温带半湿润气候。田间管理按黄淮平原冬麦区品种耕作要求进行。实验材料按照随机区组排列,每个材料作3个重复,每个小区5行,行长1.4 m,行距0.23 m,株距0.03 m。2011年10月上旬点播,一次性施足底肥,冬灌1次。于次年5月份作核磁共振和生理学检测。

1.2 硬件设置

核磁共振成像分析系统在上海纽迈电子科技有

收稿日期:2013-05-15 修回日期:2013-07-23

* 国家自然科学基金资助项目(31201122)

作者简介:杜光源,讲师,博士,主要从事植物生物化学和生物物理学研究,E-mail: duguangyuan0511@163.com

通讯作者:郭嵩光,教授,博士生导师,主要从事植物生物化学与分子生物学研究,E-mail: aiguangguo@yahoo.cn

限公司的 NMI20 基础上作了一定的改进(图 1)。该核磁共振成像分析仪既可进行核磁共振 T_2 弛豫谱分析,亦可进行磁共振成像。磁体箱温度设定为 25°C , ^1H 共振频率为 23.04 MHz , RF 探头检测腔为竖直方向,上下开口,内径 20 mm 。

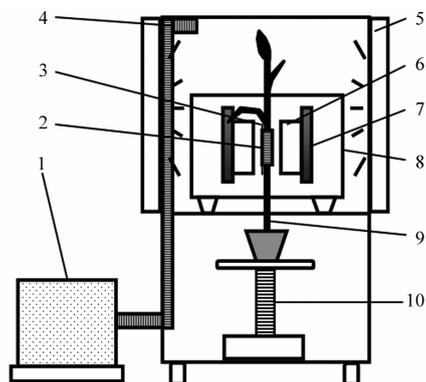


图 1 小麦核磁共振活体检测系统

Fig. 1 NMR system for wheat in vivo measurement

1. 温湿度控制箱
2. 射频探头
3. 外参管
4. 风管
5. 灯箱
6. 永磁体
7. 轭铁
8. 磁体保温箱
9. 小麦植株
10. 升降台

为保证小麦植株在活体检测时的气候环境控制,在磁体箱外构建了人工气候室。即选用铝合金为承重框架,箱体侧面采用有机玻璃,灯箱置于箱体两侧。人工气候箱的温湿度控制系统为一独立箱体,箱体内包括受温湿度控制器控制的空调、加湿器和风机,并通过风管与人工气候箱相连。人工气候箱的温度、相对湿度以及光照强度分别设定为 22°C 、 50% 以及 $10\ 000\text{ lx}$ 。

田间的小麦植株于上午 $8:00$ 连根带土移植至植物核磁共振分析实验室,对旗叶和倒 2 叶进行核磁共振检测、含水率以及叶绿素含量分析。核磁共振 T_2 弛豫谱分析和含水率检测的取样如下:截取小麦叶片叶基部以上 12 cm 长区段,均分为 4 段重叠放入试管,进行核磁共振 T_2 弛豫谱检测,然后称重, 80°C 干燥至恒质量后计算相对含水率。核磁共振 T_2 弛豫谱检测和叶绿素含量检测的取样与上述方法一样,叶片样品经核磁共振 T_2 弛豫谱检测和称重后,液氮速冻,保存于 -40°C 留作叶绿素含量检测。以上分析重复 3 次。

小麦植株活体成像时将两个直径为 1.5 mm 的玻璃管固定于探头内壁作为外参管,以便推算视场(Field of view, FOV)、图像分辨率以及信号强度校准。外参溶液分别为 10 mmol CuSO_4 溶液和 2 mmol CuSO_4 溶液。

1.3 核磁共振检测方案

核磁共振 T_2 弛豫谱检测采用 CPMG 脉冲序列,参数设置如下:相邻回波之间的时间间隔即回波时

间 T_E 为 $200\ \mu\text{s}$,每个脉冲序列包含 $14\ 000$ 个 180° 脉冲,重复时间 T_R 为 10 s ,累加次数为 4 次,总检测时间为 52 s 。

小麦的磁共振成像采用 MSE 脉冲序列,成像方案包括 T_1 加权成像和 T_2 加权成像,选层方向为水平方向,位置分别为旗叶和倒 2 叶叶基部以上 3 cm 处,选层厚度为 3 mm ,频谱带宽为 20 kHz ,视场为 $28 \times 28\text{ mm}^2$, $128\text{ 像素} \times 128\text{ 像素}$,分辨率为 0.22 mm 。 T_1 加权成像的回波时间为 13.27 ms ,重复时间为 500 ms ,累加次数为 2 次,总检测时间为 2.22 min ; T_2 加权成像的回波时间为 50.05 ms ,重复时间为 $5\ 000\text{ ms}$,累加次数为 2 次,总检测时间为 21.57 min 。

1.4 生理学检测

含水率检测采用称量法,叶绿素含量检测采用丙酮法^[10]。

1.5 数据处理

核磁共振 T_2 弛豫谱采用仪器自带的反演软件 $T_InvfitGeneral$ 分析,选择连续谱模式。核磁共振参数与生理指标之间的相关性采用数学软件 Matlab 7.0.1 分析并作图,其中核磁共振 T_2 弛豫谱幅度为所有组分峰面积之和,根据核磁共振技术惯用的表示方法,该参数为任意单位(Arbitrary units, A. U.)。平均 T_2 弛豫时间为

$$T_{2,\text{mean}} = \int T_2 A(T_2) dT_2 / \int A(T_2) dT_2 \quad (1)$$

式中 T_2 ——横向弛豫时间

$A(T_2)$ —— T_2 弛豫时间对应的幅度, A. U.

根据磁共振成像理论,核磁共振图像的信号强度不仅与像素点的含水率有关,而且受弛豫特性的影响。弛豫时间较短的溶液受到射频激励后在静磁场 B_0 方向的磁化强度 M_z 将快速恢复,因此 T_1 加权图像具有较强信号强度; T_2 加权图像则正好相反,因为在垂直于静磁场方向上的磁化强度 M_{xy} 的快速衰减而信号更弱。 10 mmol CuSO_4 溶液较之 2 mmol CuSO_4 溶液的弛豫时间更短。本研究的 T_1 加权成像将 10 mmol CuSO_4 溶液的信号强度当作 100% 来校准像素亮度,而 T_2 加权成像则将 2 mmol CuSO_4 溶液的信号强度作为 100% 。磁共振图像中小麦叶片的平均像素信号强度由叶片所在像素的信号强度经提取后得出。

2 结果与分析

2.1 小麦叶片衰老过程核磁共振 T_2 弛豫谱幅度和含水率的变化

小麦叶片的 T_2 弛豫谱幅度和含水率随日序的变化如图 2 所示。5 月下旬为陕 229 灌浆乳熟期,

该时期倒2叶进入降解期,叶色开始变黄,而旗叶亦有衰老迹象,叶色亦开始变淡,但是 T_2 弛豫谱幅度和含水率并未出现明显变化。6月上旬陕229灌浆趋近结束,叶片进入衰亡期, T_2 弛豫谱幅度和含水率均出现显著减小。

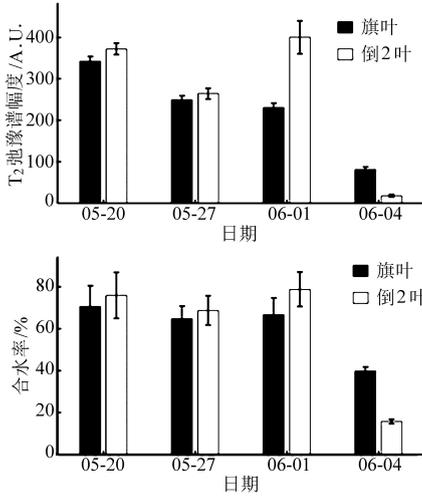


图2 小麦叶片的 T_2 弛豫谱幅度和含水率的日序变化

Fig. 2 Variation of amplitude of T_2 relaxation spectrum and water content of wheat leaves during senescence process

2.2 小麦叶片衰老过程平均 T_2 弛豫时间和叶绿素含量的变化

小麦叶片的平均 T_2 弛豫时间和叶绿素含量的日序变化如图3所示。叶片在衰老前期(6月1日之前)平均 T_2 弛豫时间逐渐增大,叶绿素含量逐渐减小,旗叶的叶绿素含量大于倒2叶,而且旗叶的平均 T_2 弛豫时间相对较小;6月4日选取的陕229植株均有倒2叶完全衰亡,其平均 T_2 弛豫时间和叶绿素含量均达到最小值,而旗叶仍保持一定的含水率,虽然其叶绿素含量亦基本达到最小值,但平均 T_2 弛豫时间仍未到衰减阶段。

2.3 小麦的磁共振活体成像

小麦的磁共振活体成像如图4、图5所示,图像偏左两个较小圆形区域分别为外参,其中 10 mmol CuSO_4 溶液位于 2 mmol CuSO_4 溶液上方,图像正中的圆环为小麦茎的横截面,茎周围的不规则曲线为叶片的横截面。

T_1 加权图像(图4)中 10 mmol CuSO_4 溶液的信号强度为 $(4.71 \pm 0.28) \times 10^4 \text{ A. U.}$, 高于 2 mmol CuSO_4 溶液; T_2 加权图像(图5)则正好相反, 2 mmol CuSO_4 溶液的信号强度更高,像素平均信号强度为 $(4.86 \pm 0.45) \times 10^4 \text{ A. U.}$ 。

成像方案的选择对陕229叶片的像素亮度有显著影响, T_1 加权图像中具有生理活性的叶片的信号强度与茎相当(图4),而 T_2 加权图像中叶片的信号

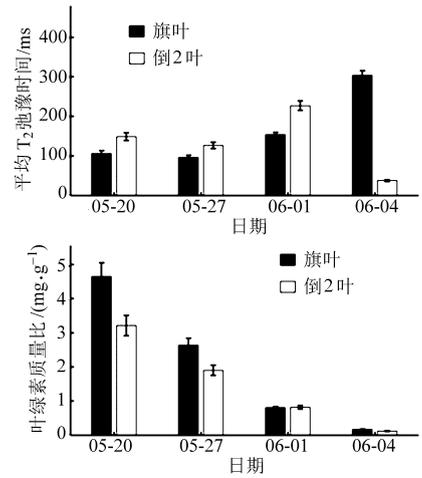


图3 小麦叶片的平均 T_2 弛豫时间和叶绿素含量的日序变化

Fig. 3 Variation of average T_2 relaxation time and chlorophyll content in wheat leaves during senescence process

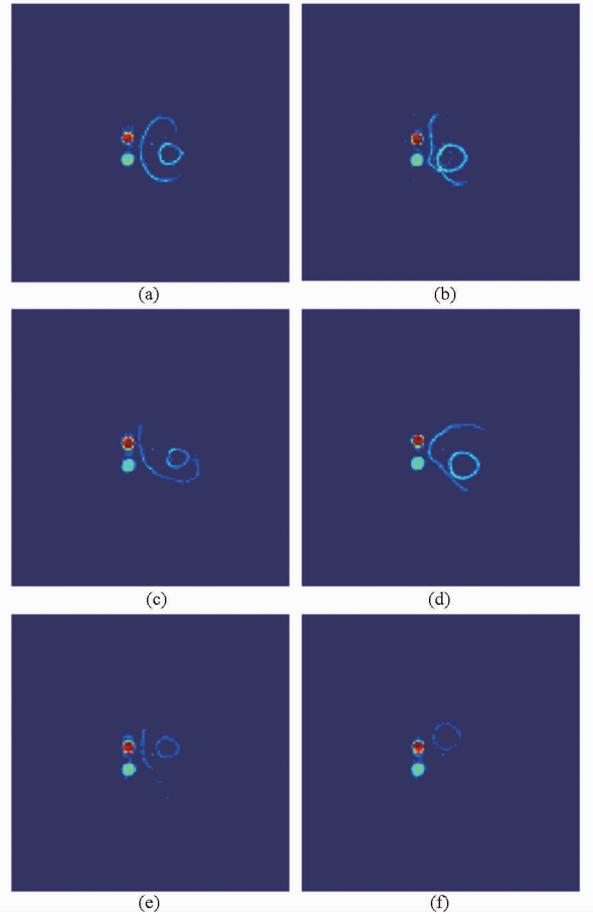


图4 小麦陕229的 T_1 加权成像

Fig. 4 T_1 weighted MRI of culm in Wheat S229

- (a) 05-25, 旗叶叶基上3 cm (b) 05-25, 倒2叶叶基上3 cm
(c) 05-31, 旗叶叶基上3 cm (d) 05-31, 倒2叶叶基上3 cm
(e) 06-04, 旗叶叶基上3 cm (f) 06-04, 倒2叶叶基上3 cm

强度明显小于茎(图5)。

图6a 给出了 T_1 加权图像叶片平均像素信号强

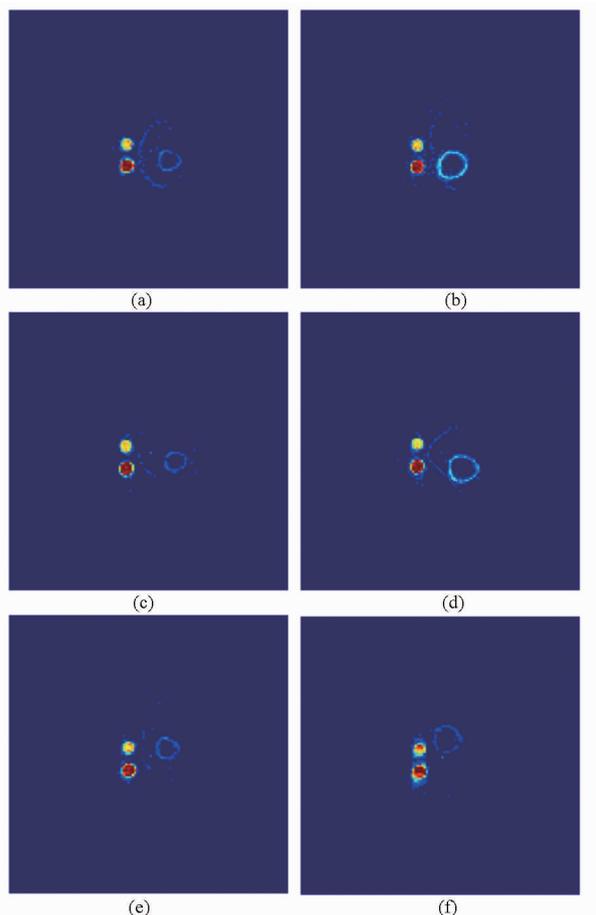


图5 小麦陕229的 T_2 加权成像

Fig. 5 T_2 weighted MRI of culm in Wheat S229

- (a) 05-25, 旗叶叶基上3 cm (b) 05-25, 倒2叶叶基上3 cm
(c) 05-31, 旗叶叶基上3 cm (d) 05-31, 倒2叶叶基上3 cm
(e) 06-04, 旗叶叶基上3 cm (f) 06-04, 倒2叶叶基上3 cm

度变化趋势。无论旗叶还是倒2叶,随着叶片日趋衰老,叶片的信号强度逐渐减小;图6b所示的 T_2 加权图像叶片信号强度变化可分为两个阶段,衰老前期信号强度减小不明显(旗叶),进入衰老后期则信号强度迅速衰退(倒2叶)。比较旗叶和倒2叶,叶片衰老前两种叶龄叶片的信号强度相当或者倒2叶信号强度略高;随着叶片的衰老和灌浆临近结束,倒2叶的信号强度的衰减明显快于旗叶。

3 讨论

核磁共振 T_2 弛豫谱幅度与 ^1H 含量呈正比,被用于解析水分、油脂以及淀粉含量^[11]。理论上,水分子和生物大分子的 ^1H 均会产生核磁共振信号,但它们的弛豫特性有较大差异。生物大分子的 ^1H 受化学集团束缚其 T_2 弛豫时间远远小于水分子 ^1H ,比如脂类分子的 ^1H 的 T_2 弛豫时间约为200~400 ms,而纯水的 T_2 弛豫时间约为2 s。另外,水分的 T_2 弛豫特性受界面效应影响,植物细胞中央液泡水的 T_2 弛豫时间较之细胞质水以及细胞壁水更长^[6, 12]。植

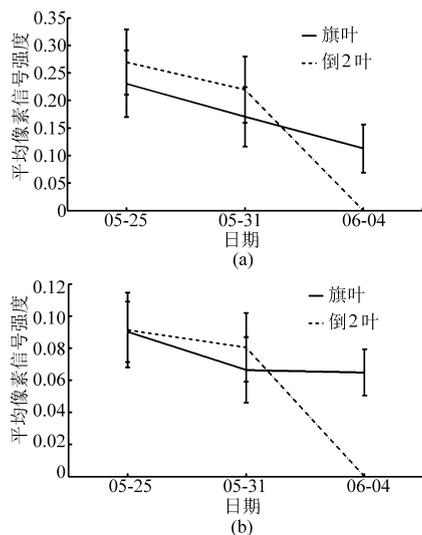


图6 小麦陕229叶片的平均像素信号强度

Fig. 6 Average pixel signal intensity in NMR images of leaves in Wheat S229

(a) T_1 加权图像 (b) T_2 加权图像

物组织的结构和成分复杂,其 T_2 弛豫谱通常为多组分。但不同器官中各种成分的 T_2 弛豫谱区分度差异明显,比如油料种子含油率的 T_2 弛豫谱分析要求样品含水率低于15%^[13-14]。单边核磁共振设备的研究结果亦表明,核磁共振 T_2 弛豫谱可有效探测植物叶片的水分状态。

核磁共振 T_2 弛豫谱分析的可靠性受设备的磁场均匀性、环境扰动以及反演算法等因素影响。单边核磁共振设备适用于扩展型植物叶片的检测,但是其磁场均匀性较差, T_2 弛豫衰减非常快,对谱仪以及功放系统的采样速度要求极高。传统的核磁共振设备的磁场均匀性高,小麦的叶片形态特征使其易于置于竖直检测腔。本研究对设备的改造未影响到磁体箱的恒温性(25.00 ± 0.01) $^{\circ}\text{C}$,保证了磁场强度的稳定性以及检测结果的可靠性。

核磁共振 T_2 弛豫谱的解析方法有 splmod、contin 以及 SIRT 等,总的来所可分为连续谱(contin 和 SIRT 算法)和离散谱(splmod 和 SIRT 算法)两类^[11, 15-16]。SIRT 算法既有离散谱模式也有连续谱模式,其中离散谱模式需要选定 T_2 组分数并给定每个组分的 T_2 值范围。作物的不同器官以及在不同生长发育期往往表现出相异的 T_2 弛豫特性,离散谱模式的前提条件难以确定。连续谱模式则不需要进行条件预设,但是连续谱算法对背景噪音比较敏感,同一生物样品的 T_2 组分数以及弛豫谱峰的 T_2 值的可重复性比较差。为提高分析结构的稳定性,本文没有直接采用弛豫谱峰的 T_2 值,而是用平均 T_2 弛豫时间来表征小麦叶片的 T_2 弛豫特性。

T_2 弛豫谱幅度与含水率之间的极显著线性关系

已得到广泛验证,这是因为核磁共振信号来自于水分子 ^1H 。本研究用于核磁共振 T_2 弛豫谱分析的叶片为鲜样,含水率较高。 T_2 弛豫谱幅度 A 与样品相对含水率呈正比^[13]。尽管本研究中小麦叶片的 T_2 弛豫谱幅度 A 与相对含水率有较好的正相关性(相关系数 $r=0.9771$, $n=8$),但其显著水平不及与绝对含水率之间的相关性(相关系数 $r=0.9989$, $n=8$)。

叶绿素本身不产生核磁共振信号,叶绿素含量与 T_2 弛豫时间的相关性需从叶片衰老过程来深入探讨。 T_2 弛豫时间与细胞溶质(比如水溶性糖)浓度、水分微区分布以及膜透水率等因素有关^[6,17-18]。小麦叶片衰老为程序性的主动衰亡,整个过程可细分为衰老初期、降解期和衰亡期。在衰老初期,叶绿素周转减缓,叶绿体逐渐降解,叶肉细胞的光合同化物逐渐减少,水分子 ^1H 与生物大分子 ^1H 之间的能量化学转移减少^[18],平均 T_2 弛豫时间因此而延长;到叶片降解期,细胞内的亚细胞器逐渐崩解,但细胞膜相对完整,细胞仍能保持一定的水分,细胞水的平均弛豫时间仍有增大空间;叶片衰亡期细胞膜和细胞核降解,细胞水分迅速散失,因此 T_2 弛豫谱幅度和平均 T_2 弛豫时间均出现锐减。简言之,叶绿素含量与细胞膜系统的完整性有关,从而间接影响到叶片的细胞水分微区分布和 T_2 弛豫特性。

采用 MSE 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 T_E 、 T_R 等参数设置有关,可表示为^[19-20]

$$S = S_0(1 - e^{-T_R/T_1})e^{-T_E/T_2} \quad (2)$$

式中 S ——像素信号强度

S_0 ——自旋密度,即含水率

T_1 ——纵向弛豫时间,ms

根据样品的 T_1 和 T_2 弛豫特性恰当设定 T_E 和 T_R ,可得到不同的成像效果。如果 $T_E \ll T_2$,而 T_R 与 T_1 相当,则含水率以及位于该像素点的植物组织的 T_1 值对信号强度有显著影响,因为样品第一次采样结束时磁化强度未完全恢复即进入第二次采样,信号强度因饱和效应而损失,由此获得的图像称为 T_1 加权像;如果 T_E 与 T_2 相当,而 $T_R \gg T_1$,则含水率和 T_2 决定了像素点信号强度(其中 T_2 较小的植物组织的像素点由于 T_2 弛豫衰减而损失严重),这样获得的图像称为 T_2 加权像。

本研究磁共振成像的外参 CuSO_4 溶液为典型的弛豫剂,硫酸铜浓度越高, T_1 弛豫时间和 T_2 弛豫时间均会显著减小, T_1 加权图像中 10 mmol CuSO_4 溶液信号强度最高,而 T_2 加权图像中 2 mmol CuSO_4 溶液

信号强度最高。外参的信号强度有较大波动,说明绝对信号强度的可比性较差,需通过外参来校准信号强度。

叶片和茎的 T_1 加权图像信号强度差异不大,而 T_2 加权图像中叶片的信号强度明显小于 T_1 加权图像,这说明叶片和茎的 T_2 弛豫特性有较大差异。对比小麦器官和 CuSO_4 溶液的 T_2 弛豫谱发现,小麦叶片的平均 T_2 弛豫时间与 10 mmol CuSO_4 溶液相当,而茎则与 2 mmol CuSO_4 溶液的弛豫时间相近。这与两种器官的结构特征有关,与茎秆相比,小麦叶片有大量的“固-液”以及“气-液”界面,界面效应导致其 T_2 弛豫时间很短。由于弛豫时间的加权效应,使得叶片在 T_1 加权图像中有相对较强的信号强度,而在 T_2 加权图像中则信号较弱。

核磁共振 T_2 弛豫谱表明,叶片在衰老前期似乎失水并不明显,但是磁共振成像的叶片平均信号强度分析却显示叶片在衰老前期已经有一定程度的失水。这可能因为 T_2 弛豫谱反映的是全局水分状态,其中微管组织水占较大比重,部分叶肉细胞失水对总体水分状态的影响并不明显;而磁共振图像中叶片平均像素信号强度是将选层内细胞所在的像素点作平均,水分分布的变化将被呈现。结合磁共振成像理论和核磁共振弛豫理论,可分析小麦叶片磁共振图像信号强度的变化规律。磁共振图像的信号强度由含水率和弛豫特性共同决定。一方面,叶片衰老失水将导致信号强度减弱;另一方面,从衰老初期到降解期叶片弛豫时间增大,这对 T_1 加权图像和 T_2 加权图像信号强度的影响刚好相反, T_1 加权图像表现为信号强度减弱,而 T_2 加权图像有增强的趋势,在一定程度上补偿了因失水导致的信号强度丧失。衰亡期叶片迅速干枯,信号强度主要受含水率影响。

4 结论

(1)构建了小麦核磁共振活体成像分析系统,发现核磁共振 T_2 弛豫谱、磁共振 T_1 加权成像和磁共振 T_2 加权成像等方法可有效评估小麦叶片的生理活性和衰老态势。

(2)核磁共振 T_2 弛豫谱幅度与叶片含水率呈线性关系,平均 T_2 弛豫时间与叶片衰老时期有关,从衰老初期到降解期平均 T_2 弛豫时间增大,衰亡期平均 T_2 弛豫时间锐减。

(3)叶片整个衰老过程在 T_1 加权图像中表现为信号强度的逐渐减小,在 T_2 加权图像中表现为信号强度先增大后锐减直至消失。

(4)3种核磁共振检测方法各有优势:核磁共振 T_2 弛豫谱检测极为快捷方便,可结合含水率和弛

豫特性综合反映叶片的总体生理活性;磁共振成像则直观呈现叶片水分和生理状态的空间分布;两种成像方法中, T_1 加权成像比较迅速, T_2 加权成像耗时较长,但对比度高,对叶片衰老极为敏感。

参 考 文 献

- 1 Reynolds M, Manes Y, Izanloo A, et al. Phenotyping approaches for physiological breeding and gene discovery in wheat[J]. *Annals of Applied Biology*, 2009,155(3):309–320.
- 2 Zhang S W, Wang C F. Research status quo and future of low temperature wheat genotypes[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008,7(12):1413–1422.
- 3 张嵩午. 小麦的冷温状态和逆向衰老[J]. *中国科学基金*, 2011,25(3):148–153,163.
Zhang Songwu. Low temperature state and inverse leaf aging of wheat[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2011,25(3):148–153,163. (in Chinese)
- 4 Zhang S W, Wang C F, Yao Y H. Inverse leaf aging sequence (ILAS) and its significance of wheat[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011,10(2):207–219.
- 5 Capitani D, Brilli F, Mannina L, et al. In situ investigation of leaf water status by portable unilateral nuclear magnetic resonance[J]. *Plant Physiology*, 2009,149(4):1638–1647.
- 6 van As 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.
- 7 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.
- 8 Lim P O, Kim H J, Nam H G. Leaf senescence[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2007,58:115–136.
- 9 周水琴, 商德胜, 应义斌, 等. 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, et al. 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)
- 10 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- 11 Castro C, Gazza L, Ciccoritti R, et al. Development of wheat kernels with contrasting endosperm texture characteristics as determined by magnetic resonance imaging and time domain-nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Cereal Science*, 2010,52(2):303–309.
- 12 van der Weerd L, Claessens M M A E, Ruttink T, et al. Quantitative NMR microscopy of osmotic stress responses in maize and pearl millet[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001,52(365):2333–2343.
- 13 Pedersen H, Munck L, Engelsen S. Low-field 1H nuclear magnetic resonance and chemometrics combined for simultaneous determination of water, oil, and protein contents in oilseeds[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2000,77(10):1069–1077.
- 14 Rubel G. Simultaneous determination of oil and water contents in different oilseeds by pulsed nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1994,71(10):1057–1062.
- 15 Novikov E G, van Dusschoten D, van As H. Modeling of self-diffusion and relaxation time NMR in multi-compartment systems[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 1998,135(2):522–528.
- 16 van der Weerd L, Vergeldt F J, de Jager P A, et al. Evaluation of algorithms for analysis of NMR relaxation decay curves[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2000,18(9):1151–1157.
- 17 Fabri D, Williams M A K, Halstead T K. Water T_2 relaxation in sugar solutions[J]. *Carbohydrate Research*, 2005,340(5):889–905.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 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.

Investigating Senescence Status of Wheat Leaves by Nuclear Magnetic Resonance

Du Guangyuan¹ Tang Yan² Zhang Songwu¹ Wang Changfa³ Guo Aiguang²

(1. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Nuclear magnetic resonance (NMR) technique has been broadly used in probing plant water relations. However, the relationship between NMR parameters and photosynthetic traits is still not clear. An NMR system was constructed to perform non-imaging relaxation measurement or magnetic resonance imaging on wheat non-invasively and non-destructively. It was found that from the onset of leaf senescence to the degradation stage, the average T_2 relaxation time ($T_{2,\text{mean}}$) increased gradually and the chlorophyll content decreased, while the amplitude (A) of T_2 relaxation spectrum and water content kept stable. When wheat leaves approached cell death, all of the above mentioned NMR and physiological parameters decreased to its minimum value. It was deduced that A and the water content of wheat leaves were linearly correlated. On the other hand, $T_{2,\text{mean}}$ was related with leaf senescence status. Therefore, non-imaging T_2 relaxation technique was thought a fast and powerful method to estimate the senescence status of wheat leaf. In addition, T_1 weighted imaging and T_2 weighted imaging could represent leaf physiological status directly based on the relaxation property. T_1 weighted imaging was comparatively time-saving, whereas T_2 weighted imaging was much more sensitive to leaf aging.

Key words: Wheat leaf Senescence Nuclear magnetic resonance T_2 relaxation time Magnetic resonance imaging

(上接第 275 页)

Parallel Simulation of Uniaxial Scattered Bamboo Root System

Zhang Yunwei¹ Yu Yong¹ Wang Dalong² Zhou Xuan² Wang Yanjun²

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: During the simulation of bamboo rhizomes, there are some faced difficulties caused by high strength of calculation and large amount of data. Therefore, it is hard to satisfy the simulation performance requirements by using traditional architecture based on single processor and serial computing. In order to solve this problem, a multi-nodes parallel simulation mechanism was proposed based on network compute cluster, and the parallel simulation platform was built for uniaxial scattered bamboo rhizomes. The parallel simulation platform was composed of modeling node, task managing node, graphics node and network switch in hardware. The growth model of uniaxial scattered bamboo rhizomes was constructed on the basis of SimRoot model, whose geometric architecture parameters and growth parameters can be obtained through experimental observation. Function decomposition method was used for dividing integral task of growth modeling into fragments, and the corresponding task scheduling mode was established. Then, multi-nodes parallel growth modeling mechanism was designed. Finally, as an example, multi-nodes parallel simulation experiments for *Phyllostachys parvifolia* were executed. The experimental results show that multi-nodes parallel simulation based on network computer cluster appears to have obvious efficiency in reducing memory demand and simulation time, which has good adaptability to the large-scale simulation of scattered bamboo rhizomes.

Key words: Uniaxial scattered bamboo Underground rhizome Parallel simulation Growth modeling Network computer cluster