

DOI: 10.11766/trxb201602220585

# 基于低场核磁技术研究土壤持水性能与孔隙特征\*

孔超<sup>1,2</sup> 王美艳<sup>1†</sup> 史学正<sup>1</sup> 徐胜祥<sup>1</sup> 郭乃嘉<sup>1,2</sup> 杨培强<sup>3</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 上海纽迈电子科技有限公司, 上海 200333)

**摘要** 为研究常规水稻土和设施蔬菜地土壤持水性能与孔隙分布特征, 利用低场核磁共振技术, 获取田间持水量状态的土壤 $T_2$ 谱线特征, 在此基础上分析了土壤失水时信号幅值、弛豫时间与土壤含水量和孔隙大小分布的关系。结果表明: 水稻土和设施蔬菜地土壤中孔隙分布均比较分散, 小孔隙居多, 大孔隙较少, 水稻田转化为设施蔬菜地后, 土壤孔隙半径整体变小, 土壤结构恶化。在土壤失水过程中, 波峰消减与谱线偏移同时发生, 小峰优先消失且消减速率大于主峰, 表明该过程中孔隙收缩与水分散失同时发生, 土壤孔隙由大到小依次不断排水。低场核磁共振作为一种快速、无损的测量工具, 能够更直接、更准确地反映出土壤水分迁移过程和孔隙分布规律, 从而为设施栽培土壤退化机理和土壤改良提供新的理论和技术支撑。

**关键词** 低场核磁共振; 水稻土; 设施蔬菜地土壤;  $T_2$ 谱; 土壤持水性能; 孔隙分布

**中图分类号** S152 **文献标识码** A

土壤是位于地球陆地表面和浅水域底部的具有生命力和生产力的积聚层, 是地球系统的重要组成部分和调控环境质量的中心要素<sup>[1]</sup>。土壤水作为土壤资源的重要组成部分, 是一切陆生资源赖以生存的基础。土壤孔隙结构是土壤的基本属性, 土壤孔隙的数量、大小分布、形状和三维空间构型决定了土壤通气供水的能力, 土壤孔隙也是土壤生物运动的通道和生活的重要场所<sup>[2]</sup>。因此, 研究土壤水分状态与孔隙分布对认识土壤基本属性具有重要意义。

随着一系列理论和研究方法的发展, 土壤水分状态与孔隙分布的研究在过去的十多年里取得了巨大成就。按研究方法不同大致分为两类: 第一类是采用经典方法, 如: Glab等<sup>[3]</sup>利用压力膜仪和压汞法测定土壤水分特征曲线和压汞曲线, 推算不同孔径孔隙的分布状况; 第二类是采用先进的图像

获取与处理技术, 如: Moreau等<sup>[4]</sup>通过染色结合切片法和数字图像处理方法研究土壤孔隙的空间分布状况, 获得土壤大孔隙的周长、面积和数量等指标。利用X射线CT(X-ray computed tomography)扫描和图像处理技术使得土壤孔隙结构的三维空间可视化能够实现<sup>[5-8]</sup>。近年来, 核磁共振技术飞速发展, 按照场强大小可分为低场、中场和高场。低场核磁是指场强低于0.5 T的核磁技术, 其造价低廉, 可以实现快速无损检测水分含量以及水分在多孔介质中的交互作用<sup>[9]</sup>, 应用遍及食品、农业、生命科学、地质研究、能源勘探和高分子材料等<sup>[10-14]</sup>领域, 在极端条件下的冻融土壤也展开了相应研究<sup>[15-16]</sup>, 但在农业土壤领域的应用却较少见。本文首先介绍低场核磁共振技术的基本原理, 然后结合田间持水量状态的土壤 $T_2$ 谱线特征和土壤失水过程 $T_2$ 谱的变化来简略分析水稻土和设施蔬菜

\* 国家自然科学基金项目(41401240, 41571209)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41401240 and 41571209)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: mywang@issas.ac.cn

作者简介: 孔超(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 土壤物理。E-mail: ckong@issas.ac.cn

收稿日期: 2016-02-22; 收到修改稿日期: 2016-04-06; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-04-22

地土壤的持水性能与孔隙分布，为土壤结构研究建立新方法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样地选择与采样设计

研究区位于中国江苏省南京市谷里镇设施蔬菜基地，地处长江下游，境内地势平坦，气候类型属北亚热带季风气候，光照充分，雨量充沛，且水、热同季，年均温为15.7℃，年均降水量1 072.9 mm，成土母质为混杂下蜀黄土的河流冲积物。该基地在2006年之前为水稻田，样点布设分为2类，分别为常规水稻田和有6年蔬菜种植历史的设施蔬菜地；每类样地布置3个采样点，每个采样点采集表层土壤。

样品采集于2015年9月下旬，每个样点采集

3种类型土壤样品，即环刀样、PVC管原状土柱（50.00 mm × 49.96 mm）样和理化性质分析样，PVC管原状土柱用于核磁扫描，扫描时室内温度保持在25℃，空气湿度保持在60%左右，避免样品干裂收缩。

为模拟田间土壤失水过程，进一步将土壤中的大小孔隙区分开来，本研究利用PVC管原状土柱，对水稻土和设施蔬菜地土壤进行浸水和连续烘干处理，实验共设置5个处理，分别为：（1）田间持水量状态；（2）沥水12 h；（3）40℃烘30 min；（4）110℃烘30 min；（5）110℃烘12 h。每个处理3次重复。实验设计中各处理的质量含水量与对应的田间持水量占比如表1所示，实验中对不同处理土壤进行即时称重，即时扫描，以期控制土壤水分含量。

表1 不同类型土壤的水分状况

Table 1 Moisture status of different soils

	实测质量含水量 Measured mass water content of soil (g g <sup>-1</sup> , %)		占田间持水量百分比 Percentage of field moisture capacity (%)	
	水稻土 Paddy soil	蔬菜地土壤 Vegetable soil	水稻土 Paddy soil	蔬菜地土壤 Vegetable soil
田间持水量状态 The condition of field capacity	32.2	30.8	100	100
沥水12 h Draining 12 h	28.1	27.6	87	90
40℃烘30 min 40℃ oven-dried for 30 min	25.6	21.4	80	78
110℃烘30 min 110℃ oven-dried for 30 min	20.3	18.7	63	61
110℃烘12 h 110℃ oven-dried for 12 h	11.2	7.9	35	26

### 1.2 核磁共振原理

核磁共振（nuclear magnetic resonance, NMR）是一种快速、无损的测量技术，可以微观地揭示样品中水分的变化规律<sup>[17]</sup>。在核磁共振技术中，原子核受射频场作用撤除后以非辐射的方式逐步恢复到平衡状态，这一过程称为弛豫过程。弛豫过程所需要的时间称作弛豫时间。水分子周围不

同的物理化学环境均会影响到氢质子的弛豫特性，因此处于不同状态条件下水就表现出不同的弛豫时间（自旋-晶格弛豫时间T<sub>1</sub>和自旋-自旋弛豫时间T<sub>2</sub>）。利用低场核磁共振技术测定能反映水分子流动性的氢核的自旋-晶格弛豫时间T<sub>1</sub>和自旋-自旋弛豫时间T<sub>2</sub>，就可描述样品中水分子的运动情况及其存在的状态<sup>[18]</sup>。

目前认为分布在土壤中的水主要存在两种状态：束缚水（包括吸湿水和膜状水）和自由水（包括毛管水、重力水和地下水）<sup>[19]</sup>，低场核磁共振技术主要通过测量土壤孔隙中水的 $T_2$ 弛豫时间来确定土壤孔隙结构中小孔隙和大孔隙的分布情况。本研究对土壤进行CPMG（Carr-Purcell-Meiboom-Gill）自旋回波脉冲序列下的测试，得到自旋回波串的衰减信号，其信号是不同大小孔隙内水中氢质子信号的叠加，再经过傅里叶变换拟合得到核磁共振 $T_2$ 谱。因此， $T_2$ 谱分布反应了孔隙大小，大孔隙对应长 $T_2$ 值，小孔隙对应短 $T_2$ 值。

本研究采用单一的 $90^\circ$ 射频脉冲和CPMG脉冲序列测量土壤的 $T_2$ 值。 $90^\circ$ 脉冲序列作用土壤之后，产生的共振信号叫自由感应衰减（free induction decay, FID）信号。FID信号的衰减主要取决于外加静磁场均匀度对 $T_2$ 的影响，不考虑晶格场均匀度对 $T_2$ 的影响。利用FID测得的 $T_2$ 称为 $T_2^*$ ，它并不等于样品真实的 $T_2$ 。FID主要用于测量弛豫衰减比较快样品的横向弛豫衰减时间。对于含有两组甚至更多的弛豫时间不同的水分，必须在测量中设法消除外交静磁场的非均匀性对 $T_2$ 弛豫的影响，采用CPMG脉冲序列测量 $T_2$ 就可以达到整个目的。CPMG脉冲序列多指数衰减模型如下公式所示：

$$A = \sum A_i e^{-\frac{t}{T_{2i}}} \quad (1)$$

式中， $i=1, 2, 3 \dots$  表示体系中水分组分个数（当 $i=1$ 时，为单指数衰减模型）， $A$ 表示剩余的磁化矢量， $A_i$ 表示体系中第 $i$ 个水分组分的总磁化矢量强度， $T_{2i}$ 表示第 $i$ 个弛豫组分的横向弛豫时间， $e$ 表示自然对数的底数， $t$ 表示衰减时间<sup>[20]</sup>。

### 1.3 核磁扫描

原状土柱扫描利用上海市纽迈电子科技有限公司自主研发的23 MHz MesoMR23-060H-I 中尺寸核磁共振分析与成像系统（线圈直径60 mm，磁场强度 $0.52 \pm 0.05$  T），图谱分析采用纽迈电子科技有限公司自主研发的核磁共振分析应用软件Ver 1.0。扫描参数设置为：接受死机时间（Receiver dead time）为20  $\mu$ s，硬脉冲 $90^\circ$ 脉宽（P1）为16  $\mu$ s，硬脉冲 $180^\circ$ 脉宽（P2）为30  $\mu$ s，重复采样等待时间（TW）为2 000 ms，信号采样点数（TD）为120 000，回波个数（NECH）为3 000，重复采样次数（NS）为32，接受机带宽（SW）为250 kHz。样品扫描前首先要将标准样品（纯水）放入磁体箱内，扫描后设定标线，然后再进行土壤扫描。

## 2 结果与讨论

### 2.1 两种类型土壤基本理化性质

水稻田表层土壤有机质含量为 $37.3 \text{ g kg}^{-1}$ ，容重为 $1.25 \text{ g cm}^{-3}$ ，pH为5.0，颗粒组成按美国制划分属于粉砂质黏壤土。设施蔬菜地表层土壤有机质含量为 $23.6 \text{ g kg}^{-1}$ ，容重为 $1.36 \text{ g cm}^{-3}$ ，pH为4.2，土壤质地按美国制划分同样属于粉砂质黏壤土（表2）。设施蔬菜地土壤是由水稻土转化而来，两者属于同源土壤，成土母质相同，发育时间接近。

常规水稻田转化为设施蔬菜地后，表层土壤有机质含量减少、容重增加、总孔隙度减少、土壤酸化，颗粒组成中砂粒含量增加，粉粒含量减少，黏粒含量增加，说明水稻田转化为设施蔬菜地后土壤

表2 两种类型土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of two types of soil

利用方式 Land use type	有机质	容重	总孔隙度	pH	颗粒组成		
	Organic matter ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Total porosity (%)		Particle size composition (%)		
					砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
水稻土 Paddy soil	37.3	1.25	53	5.0	5.4	65.7	28.9
蔬菜地土壤 Vegetable soil	23.6	1.36	42	4.2	7.3	60.1	32.6

质量下降，土壤质地更加黏重。

## 2.2 田间持水量状态土壤的 $T_2$ 谱特征

对常规水稻土与设施蔬菜地表层原状土柱（0~10 cm）进行饱水处理，直至土壤含水量达到田间持水量时，即时扫描土柱后得到 $T_2$ 谱线如图1所示。图中右侧谱线代表水稻土，左侧谱线代表设施蔬菜地土壤。横坐标 $T_2$ 值反映横向弛豫时间，弛豫时间越长，孔隙半径越大；峰面积反映土壤含水量，峰面积越大，含水量越高；峰比例反映各峰面积占整个峰面积的百分比；谱线与横轴最右侧交点处的 $T_2$ 值称作最大 $T_2$ 值，反映土壤中最大孔隙半径<sup>[15-16]</sup>。图中大峰反映小孔隙中的束缚水，小峰反映大孔隙中的自由水<sup>[16]</sup>。

由图1可知，水稻土谱线中，长弛豫的小峰占整个峰面积的22.5%，短弛豫的大峰占整个峰面积的77.5%，说明水稻土中大小孔隙所占比例分别是22.5%和77.5%。设施蔬菜地土壤谱线中，长弛豫的小峰占整个峰面积的20.5%，短弛豫的大峰占整个峰面积的79.5%，说明设施蔬菜地土壤中大小孔隙所占比例分别是20.5%和79.5%。对两种类型土壤田间持水量状态的 $T_2$ 谱线分析表明，研究区土壤孔隙分布较为分散，小孔隙较多，大孔隙较少，土壤中束缚水较多，自由水较少，土壤通气透水能力较差，持水能力较强，因此，很容易因积水产生病害，影响作物的产量和品质。

对设施蔬菜地土壤和常规水稻土田间持水量状态的 $T_2$ 谱线对比发现，两种土壤的谱线类似，均由1个主峰和2~3个小峰组成，说明水稻土与设施蔬菜地土壤有相似的孔隙分布特征。与水稻土相比，设施蔬菜地土壤的谱线更靠左，波峰位置对应的横坐标 $T_2$ 值更小，弛豫时间更短，这说明，水稻土整体的孔隙半径大于设施蔬菜地土壤，且在田间持水量状态时通气能力更强；图中设施蔬菜地土壤最大 $T_2$ 值为300 ms，水稻土的最大 $T_2$ 值为2 000 ms，可知，水稻土的最大孔隙半径大于设施蔬菜地土壤。综上所述，常规水稻田转化为设施蔬菜地6年后，土壤孔隙半径变小，土壤结构恶化。

在利用核磁共振研究岩石孔隙特征领域，王为民等<sup>[21]</sup>对不同岩性的岩石在磁场作用下的 $T_2$ 谱响应特征研究发现砂岩的 $T_2$ 谱呈双峰态，泥岩的 $T_2$ 谱呈单峰态；而砾岩的 $T_2$ 谱呈三峰态，在砾岩的 $T_2$ 谱线中最右边的峰反映的是溶洞孔隙，即为大孔隙。本研究中田间持水量状态的土壤也是呈三峰态， $T_2$ 谱线中最右边的峰反映大孔隙，这与砾岩的 $T_2$ 谱线相似。可见，通过分析横向弛豫 $T_2$ 谱线可以获取土壤中孔隙的持水特性和大小分布信息，为进一步认识土壤基本属性提供新的技术手段。

## 2.3 水稻土和设施蔬菜地土壤失水时 $T_2$ 谱的变化过程

对常规水稻土与设施蔬菜地土壤进行浸水和烘

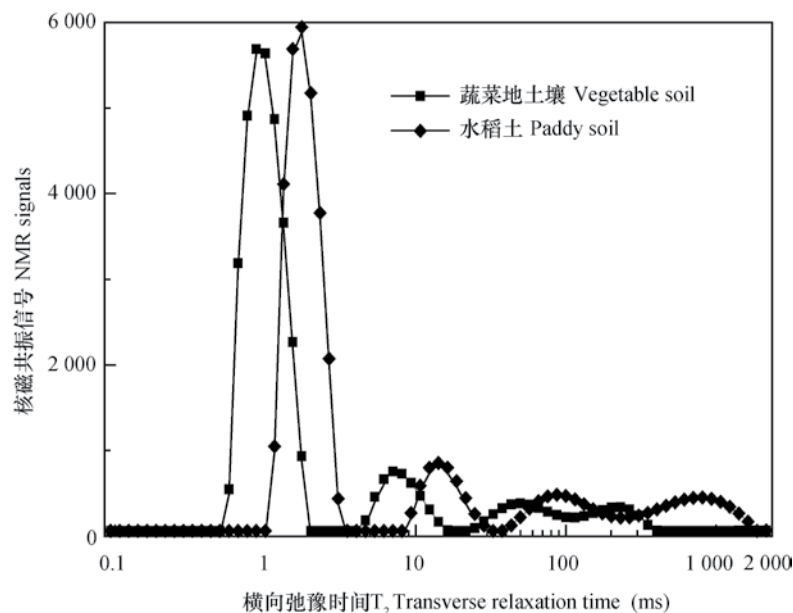


图1 田间持水量状态土壤的 $T_2$ 谱

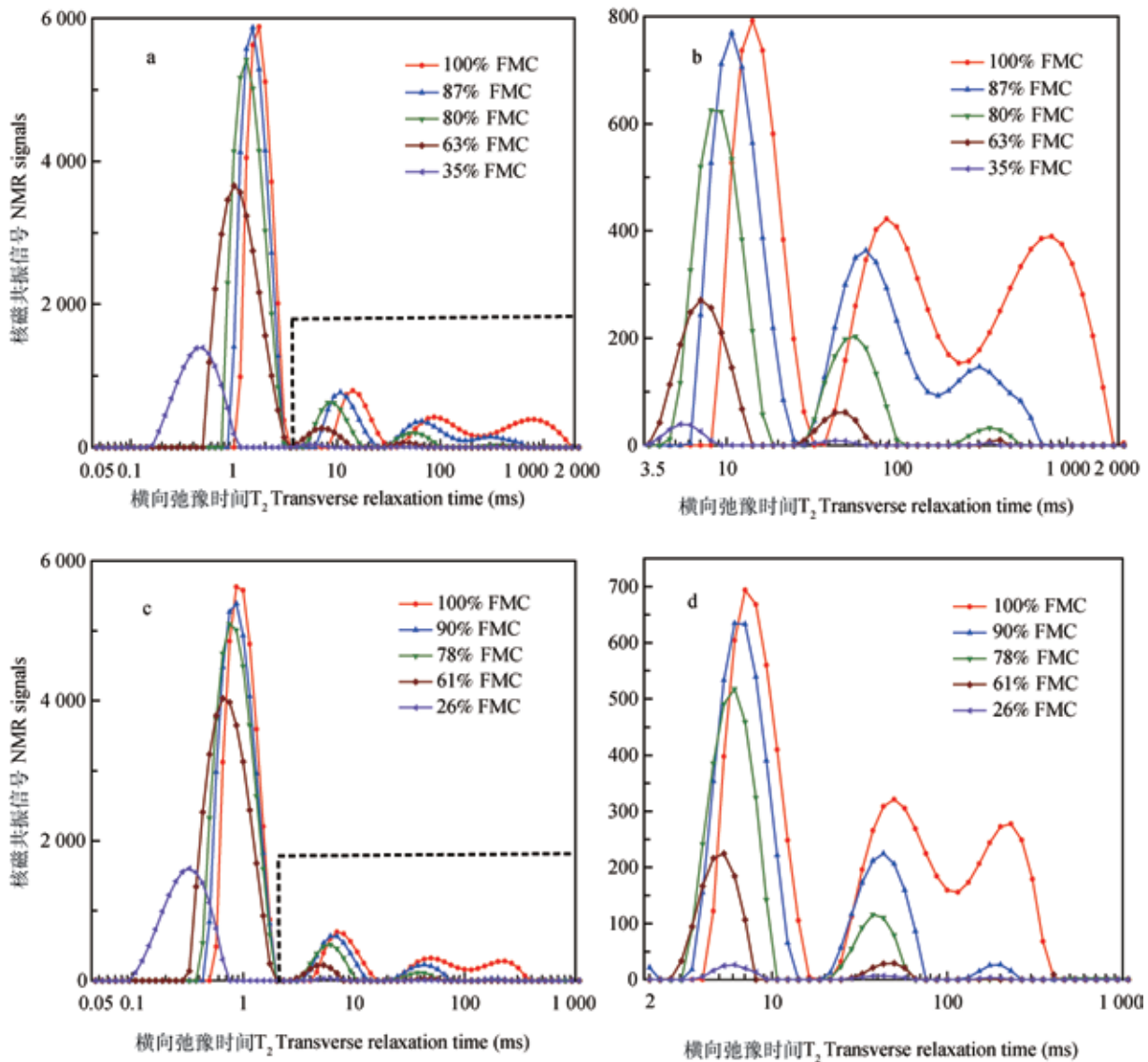
Fig. 1  $T_2$  relaxation spectra of soil samples from the fields full in field moisture capacity

干处理, 在各处理状态下即时扫描土柱得到土壤失水过程的 $T_2$ 谱线如图2所示, 其中a、b为水稻土, c、d为蔬菜地土壤。

由图2a可知, 水稻土从田间持水量状态脱水到35%田间持水量时, 谱线整体向左偏移, 说明孔隙半径收缩。同时, 峰面积也在消减, 说明土壤不断脱水。在消减顺序上, 弛豫时间长的波峰先消失, 弛豫时间短的波峰后消失, 说明脱水过程中优先脱水的是大孔隙, 其次是小孔隙。在消减速率上, 长

弛豫的波峰消减速率大于短弛豫, 说明脱水过程中自由水较束缚水更容易去除。值得注意的是, 当含水量下降至35%的田间持水量时, 谱线发生突变, 长弛豫的两个小峰基本消失, 主峰面积缩小明显, 此时的土壤收缩严重, 几乎与PVC管壁分离, 说明此时大孔隙中的水已经脱尽, 孔隙收缩严重, 而小孔隙中的水还未完全去除。

由图2c可知, 设施蔬菜地土壤从田间持水量状态脱水至26%田间持水量时, 整个峰面积由39 176



注: FMC为田间持水量; a为水稻土失水过程整个弛豫时间 $T_2$ 谱; b为水稻土弛豫时间从3.5~2 000 ms  $T_2$ 谱; c为设施蔬菜地土壤失水过程整个弛豫时间 $T_2$ 谱; d为设施蔬菜地土壤弛豫时间从2~1 000 ms  $T_2$ 谱 Note: FMC represents field moisture capacity; a:  $T_2$  relaxation spectrum of the whole water losing process in the paddy soil; b:  $T_2$  relaxation spectrum of the paddy soil from 3.5 to 2 000 ms in relaxation time; c:  $T_2$  relaxation spectrum of the whole water losing process in the facilitated vegetable soil; and d:  $T_2$  relaxation spectrum of the facilitated vegetable soil from 2 to 1 000 ms in relaxation time

图2 不同田间持水量状态土壤的 $T_2$ 图谱

Fig. 2  $T_2$  relaxation spectra of soils from fields different in field moisture content

变成13 684, 降低了25 492, 其中长弛豫的小峰面积降低了7 890, 短弛豫的主峰面积降低了17 602, 说明设施蔬菜地土壤整个脱水过程, 脱去的自由水占比31%, 束缚水占比69%。

综合图2a和图2c可知, 设施蔬菜地土壤失水过程 $T_2$ 谱线变化规律与水稻土类似, 无明显区别。设施蔬菜地土壤在各处理下的 $T_2$ 谱线更靠左, 弛豫时间更短, 这与图1中的结果一致。这可能与两种土壤质地相同有关。

李春燕等<sup>[22]</sup>利用压力膜仪测定了某区沙土、原位沙、粉沙及黏土4种土壤的水分特征曲线, 结果表明: 压力膜仪能够同时测定多种土样, 但测定周期长, 存在容重变化的问题; Glab等<sup>[3]</sup>采用压力膜仪法和压汞法测定英格兰诺福克郡长期轮作下的土壤水分特征曲线和压汞曲线, 得到了不同孔径孔隙的分布状况与水分状况; 陈学文等<sup>[23]</sup>在长期定位试验点采集耕层土壤研究其土壤孔隙度和土壤水分特征曲线, 结果表明: 免耕土壤与耕作土壤相比, 表层大孔隙度降低, 中孔隙度提升。以上研究表明, 利用压力膜仪等经典方法测定土壤水分特征曲线, 可以依靠压力值间接推算出土壤内部孔隙的大小和分布, 但是这类方法测定周期较长, 步骤繁琐, 资金投入较大, 会对样品产生损坏, 而低场核磁共振技术能够实现快速、无损地获取土壤水分分布状态和孔隙信息, 实时监测土壤水分的动态变化, 单个样品扫描分析时间仅为2分钟, 具有操作步骤简单, 数据批量处理的优势, 显著提高了实验效率。同时, 还应该看到, 在核磁研究岩土领域, 已经建立了横向弛豫时间 $T_2$ 与孔隙半径之间良好的线性关系<sup>[24]</sup>, 但目前 in 农业土壤领域中却很难实现, 其根本原因是无法准确测量土壤表面弛豫率这一重要参数。随着核磁共振在农业土壤领域研究中理论的进一步完善, 核磁共振必将作为一种先进的科研工具, 为研究土壤结构退化机理提供新的理论和技术支撑。

### 3 结 论

本文介绍了通过低场核磁共振技术扫描原状土壤的方法, 获取了田间持水量状态常规水稻土与设施蔬菜地土壤的 $T_2$ 谱线分布特征和土壤失水过程 $T_2$ 谱。研究发现水稻土与设施蔬菜地土壤中孔隙大小分布比较分散, 小孔隙居多, 大孔隙较少。水稻

田转化为设施蔬菜地后土壤孔隙半径整体变小, 土壤结构更加致密。低场核磁作为一种非侵入性、快速、无损的测量技术, 能够很好地检测出土壤孔隙的大小分布, 实现对土壤持水性能的评价。但是, 由于土壤结构本身易松散的特性, 加之利用压汞法获取的土壤表面弛豫率的不可重复性, 目前很难建立横向弛豫时间 $T_2$ 与孔隙半径之间的良好线性关系。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 赵其国, 史学正, 孙波, 等. 土壤资源概论. 北京: 科学出版社, 2007: 384—388  
Zhao Q G, Shi X Z, Sun B, et al. Soil resource introduction (In Chinese). Beijing: Science Press, 2007: 384—388
- [ 2 ] 邵明安. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006  
Shao M A. Soil physics (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2006
- [ 3 ] Glab T, Scigalska B, Labuz B. Effect of crop rotations with triticale ( × *Triticosecale* Wittm. ) on soil pore characteristics. *Geoderma*, 2013, 202/203: 1—7
- [ 4 ] Moreau E, Velde B, Terribile F. Comparison of 2D and 3D images of fractures in a Vertisol. *Geoderma*, 1999, 92 ( 1/2 ) : 55—72
- [ 5 ] Cislerova M, Votrubova J. CT derived porosity distribution and flow domains. *Journal of Hydrology*, 2002, 267: 186—200
- [ 6 ] Jassogne L, McNeill A, Chittleborough D. 3D-visualization and analysis of macro-and meso-porosity of the upper horizons of a sodic, texture-contrast soil. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58: 589—598
- [ 7 ] Tarquis A M, Heck R J, Andina D, et al. Pore network complexity and thresholding of 3D soil images. *Ecological Complexity*, 2009, 6: 230—239
- [ 8 ] Zhou H, Peng X H, Edmund P, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. *Geoderma*, 2013, 195: 23—30
- [ 9 ] 黄伟. 低场核磁共振系统的应用与研究. 武汉: 华中师范大学, 2014  
Huang W. The low-field NMR system's application and research (In Chinese). Wuhan: Central China Normal University, 2014
- [ 10 ] Qi J, Li C, Chen Y, et al. Changes in meat quality of ovine longissimus dorsi muscle in response to repeated



- freeze and thaw. *Meat Science*, 2012, 92 (4): 619—626
- [ 11 ] 要世瑾, 杜光源, 牟红梅, 等. 基于核磁共振技术检测小麦植株水分分布和变化规律. *农业工程学报*, 2014, 30 (24): 177—186  
Yao S J, Du G Y, Mou H M, et al. Detection of water distribution and dynamics in body of winter wheat based on nuclear magnetic resonance (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (24): 177—186
- [ 12 ] Wang B D, Hai J, Wang Q, et al. Coupling of luminescent terbium complexes to  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles for imaging applications. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 2011, 50: 3063—3066
- [ 13 ] 周科平, 李杰林, 许玉娟, 等. 冻融循环条件下岩石核磁共振特性的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31 (4): 731—737.  
Zhou K P, Li J L, Xu Y J, et al. Experimental study of nmr characteristics in rock under freezing and thawing cycles (In Chinese). *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (4): 731—737
- [ 14 ] Yao Y B, Liu D M, Xie S B. Quantitative characterization of methane adsorption on coal using a low-field NMR relaxation method. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 131: 32—40
- [ 15 ] Tian H, Wei C F, Wei H Z, et al. Freezing and thawing characteristics of frozen soils: Bound water content and hysteresis phenomenon. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 103: 74—81
- [ 16 ] Tian H, Wei C F, Wei H Z, et al. An NMR-based analysis of soil water characteristics. *Applied Magnetic Resonance*, 2014, 45 (1): 49—61
- [ 17 ] Takeuchi S, Fukuoka M, Gomi Y, et al. An application of magnetic resonance imaging to the real time measurement of the change of moisture profile in a rice grain during boiling. *Journal of Food Engineering*, 1997, 33 (1/2): 181—192
- [ 18 ] 孟庆云. 地面核磁共振方法平均弛豫时间的计算及应用研究. 长春: 吉林大学, 2015
- Meng Q Y. The resrarch about average relaxation time calculation based on surface MRS method and application (In Chinese). Changchun: Jilin University, 2015
- [ 19 ] 邓绥林, 刘文彰. 地学词典. 石家庄: 河北教育出版社, 1992.  
Deng S L, Liu W Z. Geological dictionary (In Chinese). Shijiazhuang: Hebei Education Press, 1992
- [ 20 ] Rugraff Y L, Desbois P, LeBotlan D J. Quantitative analysis of wheat starch water suspensions by pulsed NMR spectroscopy measurements. *Carbohydrate Research*, 1996, 295: 185—194
- [ 21 ] 王为民, 叶朝辉, 郭和坤. 陆相储层岩石核磁共振物理特征的实验研究. *波谱学杂志*, 2001, 18 (2): 113—121  
Wang W M, Ye C H, Guo H K. Experimental studies of nmr properties of continental sedimentary rocks (In Chinese). *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2001, 18 (2): 113—121
- [ 22 ] 李春燕, 李红艳, 石丽霞. 压力膜仪法在测定土壤水分特征曲线中的应用. *人民黄河*, 2011, 33 (9): 60—61  
Li C Y, Li H Y, Shi L X. Application of pressure membrane meter method to determination of soil moisture characteristic curve (In Chinese). *Yellow River*, 2011, 33 (9): 60—61
- [ 23 ] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土耕层孔隙分布和水分特征的影响. *干旱区资源与环境*, 2012, 26 (6): 114—120  
Chen X W, Zhang X P, Liang A Z, et al. Tillage effects on soil pore size distribution and soil moisture in northeast China (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26 (6): 114—120
- [ 24 ] 王胜. 用核磁共振分析岩石孔隙结构特征. *新疆石油地质*, 2009, 30 (6): 768—770  
Wang S. Analysis of rock pore structural characteristic by nuclear magnetic resonance (In Chinese). *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30 (6): 768—770

## Study on Water Holding Capacity and Pore Characteristics of Soils Based on LF-NMR

KONG Chao<sup>1, 2</sup> WANG Meiyang<sup>1\*</sup> SHI Xuezheng<sup>1</sup> XU Shengxiang<sup>1</sup> GUO Naijia<sup>1, 2</sup> YANG Peiqiang<sup>3</sup>

( 1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China )

( 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China )

( 3 Shanghai Niumag Corporation, Shanghai 200333, China )

**Abstract** 【Objective】 It is recognized that soil pore size distribution and soil water holding capacity plays an important role in soil aeration and crop root development. This study is to explore changes in water holding capacity and soil pore size distribution induced by the change of land use from paddy field to vegetable field. 【Method】 A new method of using the low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) technology was adopted to acquire features of the  $T_2$  spectrum of soil samples collected from the fields full in field moisture capacity, and on such a basis, relationships of amplitude and relaxation time of the signals of the soil samples dehydrating with soil moisture content and pore size distribution were analyzed. 【Result】 Results show that pore size distribution did not differ much between paddy soil and facilitated vegetable soil, being quiet scattered, and composed of more small pores than large ones. After paddy field being turned into facilitated vegetable field, soil pores became smaller in diameter and soil structure worse. In the process of the soil losing its water, peak reduction and spectrum shift took place simultaneously. Small peaks disappeared first, with a reduction rate much higher than that of the main peak, indicating that during the process pore shrinkage and water loss of water occurred simultaneously and the water in big pores drained first and then sequentially that in small ones. 【Conclusion】 All the findings in the study indicated that the method based on LF-NMR can be used to instantly monitor changes in soil moisture content and more directly and accurately determine soil moisture migration processes and pore distribution rules without disturbing the soil, and hence may serve as new theories and technical support for the study on mechanisms of soil degradation and soil amelioration in facilitated vegetable fields.

**Key words** Low field-nuclear magnetic resonance technology; Paddy soil; Facilitated vegetable soil;  $T_2$  relaxation spectrum; Moisture holding capacity; Pore distribution

( 责任编辑：陈荣府 )