

# 不同施肥土壤水分特征曲线空间变异\*

高会议<sup>1</sup> 郭胜利<sup>2</sup> 刘文兆<sup>2</sup> 李森<sup>1</sup> 张健<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;  
3. 无锡中科智能农业发展有限责任公司, 无锡 214105)

**摘要:** 为了探讨长期施肥土壤水分特征曲线空间变异性及其影响因素, 依托中国科学院黄土高原长武农业生态实验站中的长期定位实验, 采用高速离心机法测定长期施肥条件下不同吸力的土壤含水率, 并利用 Van Genuchten 数学模型对水分特征曲线进行拟合, 对比研究了不同施肥土壤水分特征曲线、持水性、供水性及土壤水分的有效性。结果表明: 由于长期不同施肥使其土壤结构发生差异, 导致土壤水分特征曲线存在明显的差异。化肥处理(N、NP)破坏了土壤结构, 降低了土壤持水性能; 有机肥(M、NPM)的施入增加了土壤有机质的含量, 改善了土壤结构, 提高了土壤持水性能。有机肥处理(M、NPM)土壤水分的有效性明显高于其他处理, N、NP、CK处理之间无明显差异。土壤供水能力由强到弱为 N、CK、NP、NPM、M。

**关键词:** 施肥措施 水分特征曲线 空间变异 比水容量

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0161-05

## 引言

水分是促进植物生长和调节体内外生理生态变化的关键因素<sup>[1]</sup>, 尤其是在黄土高原半干旱区, 土壤水分是土壤微生物、植物最主要的水源, 是土壤肥力重要的因素之一<sup>[2]</sup>。土壤水分特征曲线表述了土壤含水率与吸力之间的关系, 不仅反映了土壤的持水力, 也间接地反映出土壤中孔隙的分布, 是模拟土壤水分运动和溶质运移的重要参数, 对研究土壤水分的有效性, 土壤水分运动溶质运移等有重要的作用<sup>[3-5]</sup>。土壤水分特征曲线的影响因素较多、关系复杂<sup>[6-12]</sup>。目前尚不能从理论上推求土壤水势与含水率的关系, 常采用实验方法测出数据后拟合经验模型, 其中, Van Genuchten 模型因与实测数据拟合程度好而得到广泛应用<sup>[13]</sup>。因此, 通过对土壤水分特征曲线和 Van Genuchten 模型参数空间变异性的研究, 可为评估土壤持水能力和释水能力、合理的获取土壤水分运动参数等提供依据。

黄土高原生态环境脆弱, 降水量低且不均匀, 土壤水分严重缺乏, 成为影响作物产量的主要限制因素之一。该区域以旱作物为主的雨养农业区, 作物供水主要依赖于大气降水, 而大气降水对作物的水分供应又需要依赖于土壤调节<sup>[14]</sup>。因此, 探索简单易行且具有良好生态、经济和社会效应的农业管理措施显得尤为迫切和重要。有关黄土高原土壤水分

的研究大都集中在土壤水分空间分布、土壤贮水力、农田耗水、水分利用效率等方面<sup>[1-2, 15]</sup>, 且土壤水分特征曲线方面的研究多集中在林地土壤<sup>[16]</sup>, 而对黄土旱塬区长期施肥条件下土壤水分特征曲线的空间变异性鲜有报道。本文以该地区长期定位实验为对象, 深入分析不同施肥条件下土壤水分特征曲线变异及其影响因子, 探讨土壤持水、保水和土壤水分的有效性, 以期在黄土高原旱区找到可以提高和稳定土地生产力、保证粮食生产的农业管理模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

黄土旱塬区长期肥料定位实验开始于1984年。实验开始前, 实验地一直用于种植作物(小麦)。1984年, 设置空白(CK)、施氮肥(N, 120 kg/hm<sup>2</sup>)、氮磷配施(N, 120 kg/hm<sup>2</sup>; P, 26 kg/hm<sup>2</sup>)、单施有机肥(M, 75 t/hm<sup>2</sup>)、氮磷有机肥(N, 120 kg/hm<sup>2</sup>; P, 26 kg/hm<sup>2</sup>; M, 75 t/hm<sup>2</sup>)。按照随机区组3次重复的方式布设在田间。种植体系为一年一茬, 供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L., 品种“长武131”系列)。小区面积6 m × 4 m, 小区间距0.3 m, 四周保护行1 m。一般9月下旬播种(播量150~190 kg/hm<sup>2</sup>, 行距20 cm), 生长期人工及时去除杂草。成熟期人工收割, 所有地上部被移出小区, 地表残留麦茬高度低于5 cm。其中, 收获整个小区面积

收稿日期: 2013-07-24 修回日期: 2013-09-30

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102302、2013AA102304)

作者简介: 高会议, 副研究员, 博士后, 主要从事生态环境与农业信息技术研究, E-mail: hygao@iim.ac.cn

的 1/2 ,用于估算单位面积地上部生物量和籽粒产量。冬小麦收获(次年6月)后土壤休闲,期间圆盘耙机耕(深度20 cm)松土蓄墒,播种前再耕翻,准备下一茬冬小麦苗床。作物生长期及时防治病虫害。氮、磷肥分别为尿素、三料磷肥,在播种前撒施地表后耕翻入土。

### 1.2 土壤样品采集及土壤水分特征曲线测定

2010年7月,在实验地选取小区中用环刀取其原状土,重复3次,浸水饱和,测其饱和含水率;用日本HITACHI公司生产的CR21G型离心机测定土壤水分特征曲线,通过设置离心机转速以确定相对应吸力,待测试土样达到平衡后,测定该吸力下的质量含水率,离心力增加,依次测定该吸力下的质量含水率,即可得到土壤水分特征曲线。测定的吸力范围为1~1200 kPa。

土壤水分特征曲线是研究土壤持水特性的重要依据之一,揭示了土壤水的能量指标(基质势)与数量指标(土壤含水率)之间的内在关系。为了准确地表征各种土壤水分特征曲线的特征,定量地研究土壤的持水能力,土壤物理学界已建立了许多数学模型。在众多模拟水分特征曲线的数学模型中,其中Van Genuchten模型因其不仅能够适应多种土壤条件,而且能获得更高层次的模拟效果而被普遍采用<sup>[13]</sup>,公式为

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (-\alpha\varphi_m)^n]^{-m} \quad (\theta_r \leq \theta \leq \theta_s) \quad (1)$$

其中

$$m = 1 - 1/n$$

式中  $\theta_r$ ——剩余含水率  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$\theta_s$ ——饱和含水率  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

$\alpha$ ——与进气值相关的参数

$\varphi_m$ ——基质势  $\text{cm}$  水柱

$m, n$ ——土壤水分特征曲线的形状系数

本实验选用 RETC 软件,利用 Van Genuchten 模型(V-G模型)模拟不同溶质水溶液的土壤水分特征曲线。

### 1.3 土壤水分常数及水分有效性划分

土壤水分常数和水分有效性可以直接测得,也可由土壤水分特征曲线求得。为了更加直观地显示有机溶质的影响范围和水平,将土壤水势用  $p_F$  表示,即土壤水势取  $\text{cm}$  水柱作为单位,并取其绝对值的对数值。

依据前人研究结果,一般以  $p_F$  为 1.8 时的土壤含水率为田间持水量,  $p_F$  为 3.8 与 4.2 时的土壤含水率分别为暂时萎蔫系数与永久萎蔫系数<sup>[7]</sup>。据此计算出田间持水量、暂时与永久萎蔫系数及全有效水( $p_F = 1.8 \sim 4.2$ )、速效水( $p_F = 1.8 \sim 3.8$ )、迟效水

( $p_F = 3.8 \sim 4.2$ )与无效水( $p_F > 4.2$ )的土壤含水率。

### 1.4 数据处理

统计分析采用 SAS 8.1 软件和 Excel 2010 进行,当  $F$  检验显著时,进行各处理的方差分析。

## 2 结果分析

### 2.1 不同施肥措施对土壤水分特征曲线的影响

不同的施肥措施对土壤持水性能的影响表现出很大的差异性(图1)。土壤持水性能表现为有机肥处理(M、NPM)较高,化肥处理(N、NP)和不施肥处理(CK)较低,休闲处理(F)居中。长期休闲处理(F)土壤容积密度略有增加(相对1984年),土壤孔隙度降低,因此F处理土壤饱和含水率低于其他施肥处理,其他吸力条件下土壤含水率高于N、NP和CK,低于M、NPM处理。长期施用化肥(特别是单施氮肥)破坏土壤结构,降低了土壤持水性能。长期单施氮肥处理(N)在整个吸力范围内,对应的土壤含水率都要小于其他施肥处理。长期施用有机肥(M、NPM)大大改善了土壤结构,提高了土壤持水性能。因此,在整个吸力范围内,其含水率高于其他处理。

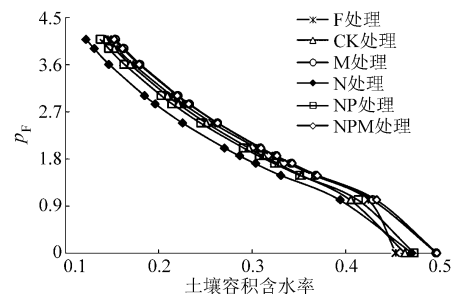


图1 施肥措施对土壤持水性能的影响

Fig.1 Effects of different fertilization on soil water characteristic

### 2.2 不同施肥措施对土壤水分特征曲线参数的影响

为了定量的研究施肥措施对水分特征曲线的影响,需要进一步分析V-G模型拟合参数。从表1

表1 施肥措施对土壤水分特征曲线V-G模型参数的影响

Tab.1 Effect of different fertilization on parameters of V-G model to soil water characteristic curve

处理	参数				
	拟合系数	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$
F	0.994**	0	0.464 <sup>a</sup>	0.148 <sup>a</sup>	2.154 <sup>a</sup>
CK	0.996**	0	0.484 <sup>b</sup>	0.289 <sup>bc</sup>	2.147 <sup>a</sup>
N	0.994**	0	0.481 <sup>b</sup>	0.313 <sup>c</sup>	2.166 <sup>a</sup>
NP	0.994**	0	0.484 <sup>b</sup>	0.249 <sup>b</sup>	2.157 <sup>a</sup>
M	0.993**	0	0.497 <sup>bc</sup>	0.254 <sup>b</sup>	2.146 <sup>a</sup>
NPM	0.996**	0	0.498 <sup>c</sup>	0.312 <sup>c</sup>	2.149 <sup>a</sup>

注: \*\* 表示相关性达到极显著水平,同列不同字母表示差异显著。

中可以看出,用 V-G 模型拟合实验结果取得了很好的效果,土壤容积含水率-土壤水势之间的相关关系达到了极显著水平 ( $P < 0.01$ )。在进行拟合过程中,如果剩余含水率 ( $\theta_r$ ) 小于 0.001 时,RECT 软件程序将以零替代  $\theta_r$  值,拟合结果中各施肥处理均小于 0.001,故其  $\theta_r$  值均为零。

由表 1 可知,长期不同施肥措施对土壤水分特征曲线参数的作用效果也有一定的差异,其中受到影响较为明显的水分特征曲线参数是  $\theta_s$  和  $\alpha$ ,对  $n$  的值影响很小,对剩余含水率  $\theta_r$  无明显影响,表明施肥措施对土壤水分特征曲线的位置影响明显,对曲线的斜率无明显影响 ( $P > 0.05$ )。

长期施肥对土壤理化性质产生很大的影响,这种影响明显地体现在不同施肥对土壤饱和含水率的影响上。休闲处理 (F) 最小,有机肥处理 (M、NPM) 最高,对照 (CK) 与化肥处理 (N、NP) 居中。与 F 处理相比,小麦的种植不但对土壤结构不会有明显的破坏作用,且利于结构体内部空气的逸出,使土壤水分的饱和程度有一定的提高。与 CK 相比,化肥处理 (N、NP) 无明显改变,有机肥处理 (M、NPM) 土壤饱和含水率分别提高了 3%、7%。参数  $\alpha$  为进气

值的倒数,休闲处理 (F) 的进气值最大,在小麦连作系统中,氮肥处理 (N) 最小,氮磷配施 (NP) 最大,其他处理居中。

### 2.3 不同施肥措施对土壤水分有效性和供水强度的影响

土壤释出水能力不仅受土壤基质势支配,还取决于土壤大小孔隙的分配比例。不同施肥处理土壤水分有效性情况见表 2。长期不同施肥处理土壤全有效含水率及速效性有效含水率均发生变化,有机肥处理 (M、NPM) 土壤水分的有效性明显高于其他处理,化肥处理 (N、NP)、空白 (CK)、休闲 (F) 处理之间无明显差异。在长期定位施肥实验中,CK 处理土壤的速效性有效含水率最低 (5.51),与 CK 相比,施肥提高了土壤速效性有效水含量,N、NP、M、NPM 分别提高了 7%、5%、10%、19%。有机肥处理全有效含水率为 13.00 ~ 14.04,明显高于 CK (11.75)。不同施肥处理对土壤的迟效性有效水和缓效性有效水的影响不明显。土壤的速效性有效含水率是突然供水状况优劣的重要标志,长期施有机肥处理土壤的供水能力较强,这与有机肥处理土壤团聚体含量明显增加是一致的<sup>[17]</sup>。

表 2 不同施肥处理土壤水分的有效性  
Tab.2 Soil water availability under different fertilization

处理	速效含水率	迟效含水率	缓效含水率	有效含水率	无效含水率	有效含水率与 无效含水率比值
F	5.78	1.38	1.61	12.33	10.60	1.16
CK	5.51	1.32	1.56	11.75	10.79	1.09
N	5.95	1.39	1.61	12.68	9.78	1.30
NP	5.84	1.38	1.61	12.46	10.41	1.20
M	6.10	1.47	1.73	13.00	12.06	1.08
NPM	6.58	1.58	1.85	14.04	12.65	1.11

## 3 讨论

### 3.1 土壤持水性与土壤理化特性之间关系分析

土壤持水能力高低取决于在一定土壤厚度条件下容积密度土壤容积密度和孔隙的大小<sup>[18]</sup>。土壤水分特征曲线是土壤质地、结构和孔隙等土壤物理特性的综合表征。土壤有机质是土壤结构形成和改善的核心物质,土壤在长期施肥过程中,土壤有机质得到不同程度的累积<sup>[19]</sup>,它们通过改善土壤结构<sup>[17]</sup>、减低土壤容积密度<sup>[20]</sup>和增加土壤毛管孔隙度等物理特性对土壤水分和持水性产生作用,其含量的高低与土壤持水功能有重要的关系。本研究中,土壤水分特征曲线参数与土壤理化性状的相关关系分析表明(表 3),参数  $\theta_s$  与土壤理化性状有着

极显著的相关关系 ( $P < 0.01$ ),参数  $\alpha$  与土壤理化性状有着显著的相关关系 ( $P < 0.05$ ),参数  $n$  仅与

表 3 模型参数与土壤理化性状相关系数矩阵

Tab.3 Matrix of model parameters and soil physical-chemical properties correlation coefficient

相关系数	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	孔隙度	容积 密度	有机质 含量
$\theta_s$	1.00					
$\alpha$	0.71**	1.00				
$n$	-0.44*	0.08	1.00			
孔隙度	0.89**	0.71**	-0.27	1.00		
容积密度	-0.89**	-0.48*	0.27	-1.00**	1.00	
有机质含量	0.94**	0.50*	-0.47*	0.94**	0.94**	1.00

注: \*\* 表示相关性达到极显著水平,\* 表示相关性达到显著水平。

有机质有着显著的相关关系。其中,容积密度表现为负相关,有机质含量和孔隙度呈正相关。土壤有机质通过改变土壤其他基本理化特性,进而影响土壤持水特性。因此,有机质对土壤含水率有着显著的控制作用,这与刘效东等<sup>[12]</sup>研究结果一致。

### 3.2 不同施肥措施对土壤持水性的影响评价

单位基质势的变化引起的含水率变化称为比水容量( $C$ ),它是土壤释水的量化指标,在评价土壤水分有效性程度方面具有极重要意义。比水容量愈大土壤持水能力愈强,但有效水供给能愈差。

从表4中可以看出,不同的施肥处理土壤在

表4 不同施肥条件下的比水容量

Tab.4 Specific water capacity of different fertilization  
mL/(g·kPa)

土壤基质势 /cm 水柱	处理				
	CK	N	NP	M	NPM
5	$6.3 \times 10^{-1a}$	$6.2 \times 10^{-1a}$	$6.7 \times 10^{-1b}$	$6.7 \times 10^{-1b}$	$6.6 \times 10^{-1b}$
10	$2.6 \times 10^{-1ab}$	$2.5 \times 10^{-1a}$	$2.7 \times 10^{-1b}$	$2.7 \times 10^{-1b}$	$2.7 \times 10^{-1b}$
20	$1.1 \times 10^{-1b}$	$1.0 \times 10^{-1a}$	$1.1 \times 10^{-1b}$	$1.1 \times 10^{-1b}$	$1.1 \times 10^{-1b}$
30	$6.3 \times 10^{-2b}$	$5.7 \times 10^{-2a}$	$6.4 \times 10^{-2b}$	$6.7 \times 10^{-2b}$	$6.5 \times 10^{-2b}$
40	$4.3 \times 10^{-2b}$	$3.9 \times 10^{-2a}$	$4.4 \times 10^{-2b}$	$4.6 \times 10^{-2b}$	$4.5 \times 10^{-2b}$
50	$3.2 \times 10^{-2b}$	$2.9 \times 10^{-2a}$	$3.2 \times 10^{-2b}$	$3.4 \times 10^{-2b}$	$3.4 \times 10^{-2b}$
60	$2.6 \times 10^{-2b}$	$2.3 \times 10^{-2a}$	$2.6 \times 10^{-2b}$	$2.7 \times 10^{-2b}$	$2.6 \times 10^{-2b}$
70	$2.1 \times 10^{-2b}$	$1.8 \times 10^{-2a}$	$2.1 \times 10^{-2b}$	$2.2 \times 10^{-2b}$	$2.2 \times 10^{-2b}$
80	$1.8 \times 10^{-2b}$	$1.5 \times 10^{-2a}$	$1.8 \times 10^{-2b}$	$1.9 \times 10^{-2b}$	$1.8 \times 10^{-2b}$
90	$1.5 \times 10^{-2b}$	$1.3 \times 10^{-2a}$	$1.5 \times 10^{-2b}$	$1.6 \times 10^{-2b}$	$1.6 \times 10^{-2b}$
100	$1.3 \times 10^{-2b}$	$1.1 \times 10^{-2a}$	$1.3 \times 10^{-2b}$	$1.4 \times 10^{-2b}$	$1.4 \times 10^{-2b}$
120	$1.0 \times 10^{-2b}$	$0.9 \times 10^{-2a}$	$1.0 \times 10^{-2b}$	$1.1 \times 10^{-2b}$	$1.1 \times 10^{-2b}$
140	$8.5 \times 10^{-3b}$	$7.3 \times 10^{-3a}$	$8.4 \times 10^{-3b}$	$9.1 \times 10^{-3b}$	$8.8 \times 10^{-3b}$
300	$3.2 \times 10^{-3b}$	$2.7 \times 10^{-3a}$	$3.1 \times 10^{-3b}$	$3.4 \times 10^{-3b}$	$3.3 \times 10^{-3b}$

注:同列不同字母表示差异显著。

5~20 kPa段比水容量处于 $10^{-1}$ 级,水分易被植物吸收利用,30~120 kPa时,比水容量为 $10^{-2}$ 级,说明此时植物吸收水分难度增加,吸收水量显著减少,水分运动显著减慢,可以根据比水容量 $10^{-2}$ 级出现的吸力值来评价土壤的释水能力和抗旱能力。当土壤比水容量达到 $10^{-2}$ 级时,各施肥处理土壤基质势均出现在 $-3.0 \times 10^4$  Pa,统计分析结果表明,N与其他施肥处理间表现出明显的差异性( $P < 0.05$ ),其他处理间无明显差异( $P > 0.05$ ),但比水容量由强至弱为:M、NPM、NP、CK,其大小代表着土壤供水能力的强弱和土壤水分有效性。韩国军等<sup>[18]</sup>研究表明,采用草木灰与无机肥两者配施可减少施肥对土壤抗旱性的影响。而本研究有机肥(M、NPM)处理通过影响小麦地上生物量,增加了土壤水分的消耗,表现出明显的缺水状况<sup>[21]</sup>。因此,在研究土壤水分亏缺时,应综合考虑其影响因素。

## 4 结论

(1) 长期不同施肥对土壤水分特征曲线表现出明显的差异,但曲线斜率基本一致。化肥处理(N、NP)破坏了土壤结构,降低了土壤持水性能;有机肥(M、NPM)的施入增加了土壤有机质的含量,改善了土壤结构,提高了土壤持水性能。M、NPM处理饱和含水率 $\theta_s$ 最大,F处理最小,CK与N、NP处理居中,且其间无明显差异。

(2) 长期不同施肥对土壤水分的供水强度影响存在一定的差异,有机肥处理(M、NPM)土壤水分的有效性明显高于其他处理,N、NP、CK处理之间无明显差异。土壤供水能力由强至弱为N、CK、NP、NPM、M。

## 参 考 文 献

- 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J].农业工程学报,2005,21(8):11-16.  
Hu Wei, Shao Mingan, Wang Quanjie. Scale-dependency of spatial variability of soilmoisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 11-16. (in Chinese)
- 潘成忠,上官周平.黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J].农业工程学报,2003,19(6):5-9.  
Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Spatialvariability of soil moisture on steep slop eland in loess hill region[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 5-9. (in Chinese)
- 胡克林,李保国,陈德立,等.农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克立格估值[J].水科学进展,2001,12(4):460-466.  
Hu Kelin, Li Baoguo, Chen Deli, et al. Spatial variability of soil water and salt in field and their estimations by the Cokriging[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 460-466. (in Chinese)
- 赵爱辉,黄明斌,史竹叶.两种土壤水分特征曲线间接推求方法对黄土的适应性评价[J].农业工程学报,2008,24(9):11-15.  
Zhao Aihui, Huang Mingbin, Shi Zhuye. Evaluation of two indirect methods to estimate soil water characteristic curve of loess soil [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 11-15. (in Chinese)
- Zelege T B, Si B C. Characterizing scale-dependent spatial relationships between soil properties using multifractal techniques [J]. Geoderma, 2006, 134(3-4): 440-452.

- 6 郭全恩, 王益权, 车宗贤, 等. 温度及矿化度对土壤持水性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(6): 52-55.  
Guo Quanen, Wang Yiquan, Che Zongxian, et al. Effect of temperature and degree of mineralization on the water-retention properties of soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(6): 52-55. (in Chinese)
- 7 高会议, 王益权. 泥炭配合基质水分特征曲线的特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 60-64.  
Gao Huiyi, Wang Yiquan. The study on characteristics of water characteristic curve of mixed struma of the peat and soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 60-64. (in Chinese)
- 8 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 46-52.  
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 46-52. (in Chinese)
- 9 景国臣, 刘绪军, 任宪平. 黑土坡耕地土壤侵蚀对土壤性状的影响[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 28-31.  
Jing Guochen, Liu Xujun, Ren Xianping. Influence of soil erosion on soil properties of black soil bank farming[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 28-31. (in Chinese)
- 10 张自军, 冯绍元, 唐泽军, 等. 北京顺义地区典型农田土壤水分特征曲线测定与分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 1-5.  
Zhang Zijun, Feng Shaoyuan, Tang Zejun, et al. Discussion on the soil water characteristic curve of the agricultural soil in Shunyi, Beijing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 1-5. (in Chinese)
- 11 郑荣伟, 冯绍元, 郑艳侠. 北京通州区典型农田土壤水分特征曲线测定及影响因素分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 77-81.  
Zheng Rongwei, Feng Shaoyuan, Zheng Yanxia. Discussion on the soil water characteristic curve of the agricultural soil in the New City of Tongzhou[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 77-81. (in Chinese)
- 12 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209-1218.  
Liu Xiaodong, Qiao Yuna, Zhou Guoyi. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(12): 1209-1218. (in Chinese)
- 13 van Genuchten R. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- 14 Liu Wenzhao, Zhang Xunchang, Dang Tinghui, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1133-1138.
- 15 Wang Yunqiang, Shao Mingan, Zhu Yuanjun, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- 16 Wang Yunqiang, Shao Mingan, Shao Hongbo. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1-2): 9-17.
- 17 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 931-938.  
Gao Huiyi, Guo Shengli, Liu Wenzhao, et al. Effect of fertilization on organic carbon distribution in various fractions of aggregates in Caliche Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 931-938. (in Chinese)
- 18 韩国君, 陈年来, 黄海霞, 等. 钾肥类型与施肥量对土壤持水特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(6): 26-29.  
Han Guojun, Chen Nianlai, Huang Haixia, et al. Effect of potassium fertilizer application on soil water retention capacity[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(6): 26-29. (in Chinese)
- 19 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 施肥措施对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1333-1338.  
Gao Huiyi, Guo Shengli, Liu Wenzhao, et al. Effects of fertilization on wheat yield and soil organic carbon accumulation in rainfed loessial tablelands[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1333-1338. (in Chinese)
- 20 梁向峰, 赵世伟, 张亚莉, 等. 子午岭次生林区土壤持水力及其与土壤有机碳的关系[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 15-19.  
Liang X F, Zhao S W, Zhang Y L, et al. Soil water holding capacity and its relationship to soil organic carbon in Ziwuling secondary forest region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(3): 15-19. (in Chinese)
- 21 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2551-2559.  
Gao Huiyi, Guo Shengli, Liu Wenzhao, et al. Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2551-2559. (in Chinese)

(下转第176页)

- 21 许景辉,马孝义, Sally D Logsdon, 等. FDR 探头结构对土壤介电谱测量的影响分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 102-107.  
 Xu Jinghui, Ma Xiaoyi, Sally D Logsdon, et al. FDR probe structure influence on the soil dielectric spectrum measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 102-107. (in Chinese)

## Measurement of Soil Moisture with T-TDR Probe Based on LFF Method

Xu Jinghui<sup>1,2</sup> Ma Xiaoyi<sup>1</sup> Sally D Logsdon<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
 3. National Lab. for Agriculture and the Environment, USDA-ARS, Ames IA 50011-3120, U. S. A)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of soil moisture measurement by T-TDR (Thermo-time domain reflectometry) probe because the needles of T-TDR were too short, this paper presented a new TDR waveform analysis method named LFF (Low frequency filter). The TDR waveform was transformed by fast Fourier transform algorithm, and then the spectrum of TDR wave was obtained. The LFF transformation could be realized by filtering the low frequency of TDR wave spectrum and transforming it by inverse fast Fourier transform. Four kinds of soil samples prepared by five different volumetric water content with twenty specimen, were used in the experiment. Through comparing the LFF method and the traditional WINTDR method with the oven drying method respectively, LFF method showed better results. The correlation coefficient of LFF with the oven drying method was  $R^2 = 0.9835$ . LFF method could improve the soil moisture measurement accuracy of T-TDR and simplify the test validation procedures and improve the test efficiency.

**Key words:** Soil Water content Measurement Low frequency filter T-TDR

(上接第 165 页)

## Spatial Variability of Soil Water Retention Curve under Fertilization Practices in Arid-highland of the Loess Plateau

Gao Huiyi<sup>1</sup> Guo Shengli<sup>2</sup> Liu Wenzhao<sup>2</sup> Li Miao<sup>1</sup> Zhang Jian<sup>1,3</sup>

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China  
 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
 3. China Sciences Intelligent Agriculture Development Co., Ltd. of Wuxi, Wuxi 214105, China)

**Abstract:** The aim of this study is to explore the spatial variability of soil moisture characteristic curve with the long-term fertilization, and find out the influencing factors of that variability. Based on the long-term experiment in Agricultural Ecological Experimental Station of the Loess Plateau of Chinese Academy in Changwu, the soil moisture of different suction with the long-term fertilization was measured using the method of high-speed centrifuge, and the water characteristic curves were obtained by the mathematical models of Van Gennuchten. Then, the parameters such as soil moisture characteristic curves, water capacity, water supply and soil moisture availability with the multiple fertilizations were compared. The results showed that the significant variations of soil moisture characteristic curve were attributed to the changes of soil structure caused by the long-term fertilization. Chemical fertilizers (N, NP) destroyed soil structure, which reduced the soil water capacity. Organic fertilizer (M, NPM) increased the soil organic matter content, and then improved the soil structure, which increased soil water capacity. The effectiveness of the soil moisture of applying manure (M, NPM) was significantly higher than that of N, NP, CK. The water supply capacity and soil water availability were ranked as N, CK, NP, NPM, M.

**Key words:** Fertilization measures Water characteristic curve Spatial variability Specific water capacity