

小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响

马昌臣^{1,2}, 王飞^{1,3}, 穆兴民^{1,3}, 康绍忠⁴

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国农业大学 中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘要: 为探讨小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响, 通过室内土柱试验, 分层测定了 0—40 cm 土层小麦不同种植密度下的土壤水分特征曲线, 以及土壤饱和含水量、毛管水含量等水力特征参数, 并用 Gardner 模型对土壤水分特征曲线进行拟合, 对比研究了小麦不同种植密度下土壤水分特征曲线及持水性、供水性以及土壤水分有效性。结果表明: 由于不同种植密度及不同土层小麦根系发育与分布的差异, 使其对土壤机械作用程度不同, 导致土壤水分特征曲线存在明显差异。根系对土壤不同大小孔隙影响程度不同, 使土壤饱和含水量、毛管水含量以及土壤有效水含量都受到不同程度的影响。而土壤的供水能力也因土壤孔隙的变化而发生改变, 0—20 cm 土层土壤供水能力呈现随种植密度增大而减弱的趋势; 而 20—40 cm 土层, 较高种植密度逐渐显现出更强的供水能力。

关键词: 土壤; 种植密度; 土壤水分特征曲线; 孔隙; 小麦

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2013)02-0105-05

Effect of the Mechanical Action of Wheat Roots on Soil Water Characteristic Curve

MA Chang-chen^{1,2}, WANG Fei^{1,3}, MU Xing-min^{1,3}, KANG Shao-zhong⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 4. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083)

Abstract: A laboratory soil column experiment planted wheat with different density was conducted to study the effect of the wheat root's mechanical action on soil water characteristic curve (SWCC). Soil water characteristic curve, saturated water content and capillary water in 0—40 cm soil layers were measured layer-by-layer. Gardner model was used to describe SWCC. SWCC, water-holding capacity and water supplying capability of different planting density were studied. The results showed that: Due to the difference of roots growth and distribution in different planting density or soil layer, the degree of mechanical effect on soil varied. That's why SWCC changed. Different size soil pores were affected, but the degrees were different. For this reason, saturated water content, capillary water and available water of different treatment were different from each other. Soil water supply capacity also varied for the change of soil pores. With the increase of planting density, it decreased in 0—20 cm soil layer. While in 20—40 cm soil layer, soil with higher planting density had better soil water supply capacity.

Key words: soil; planting density; soil water characteristic curve (SWCC); pore; wheat

土壤水分特征曲线是研究土壤水分入渗、蒸发、土壤侵蚀及溶质运移过程的关键。通过土壤水分特征曲线能了解土壤的持水性、土壤水分有效性, 了解土壤中各级大小孔隙的分布, 有利于应用数学物理方法对土壤水分运动进行定量分析^[1]。了解土壤水分特征曲线, 对研究土壤水分的储存、保持、运动、供应、SPAC 中的水分运动、土壤水分与林木吸水之间关系的机理与状况都有重要意义^[2]。土壤水分特征曲线受到质地、土壤结构、温度等因素的影响, 依据毛细管理论, 土壤水分特征曲线实际反映土壤孔隙状况和含水量之间的关系, 所以一切影响土壤孔隙状况和水分特性的因素都会对土壤水分特征曲线产生影响^[3]。植物根系伸展会对土壤大小孔

收稿日期: 2012-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于相同气候条件的人类活动对河流水沙影响定量评价: 以黄土高原延河流域为例”(41171420), 中国科学院重点部署项目“黄土高原及周边沙地近代生态环境的演变与可持续性”(KZZD-EW-04); 中荷联合主题研究项目(中国科学院对外合作重点计划项目)(GJHZ1018); Netherlands Organization for Scientific Research(NOW)(OND1339291)

作者简介: 马昌臣(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水分有效性研究。E-mail: mcc0102@163.com

通讯作者: 王飞(1971—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事区域水土保持环境效应评价研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

隙分配、分布和连通情况产生重要影响^[4]。有效孔隙不仅取决于土壤质地和结构状况,而且与植物根系活动密切相关。Imhoff 等^[5]研究认为,由于不同作物根系对土壤孔隙特征的不同影响,使对应的土壤水分特征曲线存在差异。郑荣伟等^[6]研究了不同种植条件下土壤水分特征曲线的差异,认为 0—40 cm 土层由于受到植物根系的影响,土壤结构比较复杂,土壤水分特征曲线空间变异性比较大。宋自影等^[7]研究认为:不同直径的根系会对土壤产生不同大小的机械压力,并随土层呈现出一定变化。这种压力作用势必会对土壤孔隙及土壤水分特征曲线产生一定的影响。本研究旨在通过室内模拟试验,对小麦不同种植密度下的土壤水分特征曲线进行测定分析,探讨小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响。

1 材料与方法

1.1 试验土壤制备

所用土壤采自陕西杨凌西北农林科技大学灌溉站,取土深度为 5—30 cm。将所采集土壤经自然风干,拣去动植物残体、石砾、虫体等,研磨后过 2 mm 筛,充分搅拌均匀即完成试验土壤制备。采用马尔文 MS-2000 型激光粒度仪测定各级颗粒组成,其中砂砾含量占 4.67%,粉粒含量占 69.18%,粘粒含量占 26.15%,按美国制进行土壤质地划分为粉粘壤。

1.2 试验设计

于 2011 年 10 月—2012 年 5 月在人工智能温室内进行土柱试验。土柱高 40 cm,用内径 15.2 cm 的 PVC 管制成。为方便后期取样,PVC 管每 10 cm 为一段横向锯开,再用防水胶带纸重新连接并密封。为保证填土均匀,土柱每 5 cm 为 1 层分层进行填装。填装土容重为 1.40 g/cm³。

供试作物为小麦,品种选用西农 979。设置 5 个处理,分别为每个土柱种植 2,4,6,8,10 株小麦(相当于种植密度分别为 110,220,330,440,550 万株/hm²),依次用 A、B、C、D、E 表示,以不种植小麦的土柱作为对照(CK)。每个处理设 3 个重复。栽植前土柱灌水至田间持水量的 70%,小麦种子进行消毒和催芽处理,选择长势较好且相近的小麦进行栽植。小麦生长发育过程中,控制水分以保证小麦生长发育需要;温室内温度控制在 20~30 ℃。取样环刀体积为 100 cm³,取样时每 10 cm 为 1 层分层取样,每层取 2 个环刀样:一个用于测定土壤水分特征曲线;另一个用于测定土壤饱和含水量和土壤毛管水含量。

1.3 测定项目与方法

采用高速离心机法测定脱湿过程的土壤水分特征曲线,试验用离心机系日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 型高速恒温冷冻离心机(转子编号为 61)。在 20 ℃ 恒温下设定 11 个不同转速(分别相当于吸力值 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 bar)离心到平衡时间,试验过程中同时记录设定吸力下的土壤质量含水量及土样在离心力作用下的收缩量,并计算不同吸力下土壤容积含水量,获得各土层不同处理供试土壤的水分特征曲线。由土壤水分特征曲线模拟方程推求有效水含量,一般将土壤水吸力 S 为 30 kPa 时的土壤含水量看作田间持水量, S 为 150 kPa 时的土壤含水量看作萎蔫系数,田间持水量与凋萎系数之间的差值即土壤有效水最大含量。利用环刀法测定土壤饱和含水量和毛管水含量。

用 Excel 2010、SPSS 20.0 软件对数据进行处理,用 LSD 法进行多重比较;用 Excel 2010 软件绘图;用 Matlab 2010b 进行土壤水分特征曲线模型的拟合。

2 结果与分析

2.1 种植密度对土壤水分特征曲线的影响

取各处理不同水吸力下 3 次重复的土壤容积含水量平均值作土壤水分特征曲线,如图 1。当吸力增大到一定程度后(进气值),饱水土体开始排水。在低吸力段,吸力变化较小时,土壤含水率便迅速减小,排水主要在大孔隙中进行。此后随着吸力的增大,水分特征曲线逐渐变陡,土体排水也由大孔隙排水转为中、小孔隙排水。水吸力在 100 kPa 左右时曲线出现明显的变化,水吸力小于 100 kPa 时,曲线比较平缓,而水吸力大于 100 kPa 时,只有小孔隙中能保留部分水分,土体对水分吸持能力较强,曲线形态明显趋于陡直。

将土壤中的孔隙设想为各种孔径的圆形毛管,那么土壤水吸力(S)和毛管当量直径(d)的关系可表示为: $S=4\sigma/d$ (σ 为表面张力系数)。据此可根据土壤水分特征曲线,分析不同处理对土壤孔隙大小分布的影响,并判别土壤结构的优劣^[8]。图 1 显示,不同处理对土壤当量孔隙产生不同程度影响,即对土壤结构的影响存在差异。比较各土层不同处理土壤水分特征曲线形态,可以看到:0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层不同处理曲线形态比较相近,当 $S<20$ kPa,即 $d>0.015$ mm 时,不同处理土壤水分特征曲线近似重合,但均与对照存在明

显差异。当 $20 \text{ kPa} < S < 100 \text{ kPa}$, 即 $0.003 \text{ mm} < d < 0.015 \text{ mm}$ 时, 不同处理的比水容量(曲线斜率)存在明显差异。当 $S > 100 \text{ kPa}$, 即 $d < 0.003 \text{ mm}$ 时, A、B、C、D 处理曲线近似平行, 比水容量差异较小, 而 E 处理曲线更为陡直, 当 $S > 600 \text{ kPa}$ 后, E 处理曲线与 CK 近似重合。同一吸力下对水分的吸持能力大小依次为 $CK > E > D > A > B > C$, 呈现出随种植密度增加对水分的吸持能力先减小后增加的趋势, 但在试验范围内都小于对照。

20—30 cm 土层, 当 $S < 20 \text{ kPa}$ 时, 不同种植密度下的土壤水分特征曲线近似重合, 但均与对照存在明显差异。当 $20 \text{ kPa} < S < 100 \text{ kPa}$ 时, 不同处理的比水容量存在明显差异。当 $S > 100 \text{ kPa}$ 时, 各处理曲线近似平行, 比水容量差异较小。同一吸力下对水分的吸持能力大小依次为 $CK > E > D > A > B > C$, 规律与 0—20 cm 土层近似, 但是处理间差异相对较小。30—40 cm 土层, E 处理与 CK 曲线近似重合, 在 300 kPa 左右处曲线有交叉。其他处理曲线形态与 20—30 cm 土层类似。

根系在其生长过程中, 会克服径向阻力的伸长使其在土壤中纵横穿插, 这一方面会增加土壤孔隙的连通性, 另一方面可能把相对较大的孔隙分离成多个较小孔隙。植物根孔又是土壤大孔隙形成的重要原因之一。而克服轴向阻力的根系增粗, 使土壤被压实或使之破碎^[9]。由此可见, 根系对土壤的机械作用, 会导致土壤孔隙发生极复杂的变化。由于受到根系的机械作用, 改变了土壤的孔隙特征, 使不同大小土壤孔隙受到影响。由于不同种植密度下的根系生长差异, 使不同处理下的土壤受到的影响程度不同, 进而使土壤水分特征曲线呈现出差异。同时由于根系在不同土层的分布差异, 使相同种植密度下不同土层的土壤水分特征曲线也不尽相同。有关研究^[10]表明: 根系垂直分布符合指数递减规律。在较浅土层根系分布较多, 对土壤孔隙的影响程度较大。

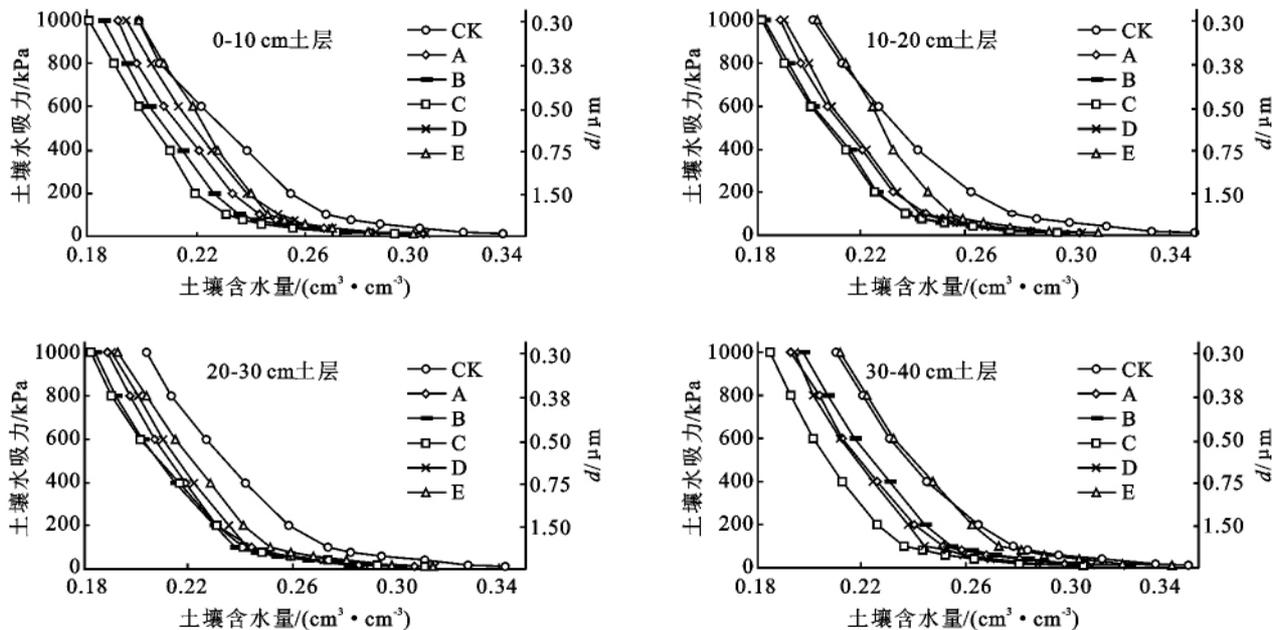


图 1 不同处理土壤水分特征曲线

为定量研究土壤水分特征曲线, 本文采用 Gardner 模型^[11]对土壤水分特征曲线实测资料进行拟合, 拟合效果较好, 拟合结果见表 1。Gardner 模型可以表示为: $\theta = A \cdot S^{-B}$ (1)

式中: θ 为土壤含水量 (cm^3/cm^3); S 为土壤水吸力 (kPa); 参数 A 决定曲线的高低, 即持水能力大小; 参数 B 决定土壤含水量随土壤水势降低而递减的快慢程度。

由表 1 可见: 在各土层中, 参数 A 总体呈现出随种植密度增加先减小后增大的趋势, 但在试验范围内都小于对照, 这体现了土壤持水能力随种植密度的增加先减小后增大的变化趋势, 与土壤水分特征曲线形态得到的结果基本一致。在 0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层内, 参数 B 总体呈现随种植密度的增加而减小的趋势, 说明较高种植密度下土壤含水量随土壤水势降低而减小得更慢。与 0—20 cm 土层相比较, 20—40 cm 土层较高种植密度下的参数 B 更大, 显示出不同土层土壤含水量随土壤水势变化速率的差异。

2.2 土壤比水容量

比水容量 (C) 为单位吸力变化引起的土壤含水量的变化, 是评价各吸力条件下土壤供水能力的重要指标。由公式 (1) 求一阶导得到不同处理的比水容量表达式见表 1。一般认为土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量值可以很好地表征土壤供水能力^[12]。

表 1 各土层不同处理土壤水分特征曲线拟合参数与比水容量表达式

土层深度/cm	处理	土壤水分特征曲线参数		R ²	比水容量表达式	土层深度/cm	处理	土壤水分特征曲线参数		R ²	比水容量表达式
		A	B					A	B		
0-10	CK	0.4355	0.1060	0.9718	$C(S)=0.04616S^{-1.1060}$	20-30	CK	0.4516	0.1082	0.9779	$C(S)=0.04888S^{-1.1082}$
	A	0.3759	0.0936	0.9900	$C(S)=0.03518S^{-1.0936}$		A	0.3883	0.0999	0.9915	$C(S)=0.03878S^{-1.0999}$
	B	0.3651	0.0932	0.9888	$C(S)=0.03402S^{-1.0932}$		B	0.3824	0.1007	0.9869	$C(S)=0.03852S^{-1.1007}$
	C	0.3635	0.0965	0.9907	$C(S)=0.03507S^{-1.0965}$		C	0.4060	0.1103	0.9871	$C(S)=0.04480S^{-1.1103}$
	D	0.3742	0.0889	0.9845	$C(S)=0.03328S^{-1.0889}$		D	0.3924	0.1000	0.9854	$C(S)=0.03923S^{-1.1000}$
10-20	E	0.3614	0.0810	0.9829	$C(S)=0.02928S^{-1.0810}$	E	0.4009	0.0992	0.9827	$C(S)=0.03977S^{-1.0992}$	
	CK	0.4360	0.1121	0.9916	$C(S)=0.04890S^{-1.1121}$	CK	0.4414	0.1089	0.9804	$C(S)=0.04808S^{-1.1089}$	
	A	0.3839	0.0975	0.9893	$C(S)=0.03741S^{-1.0975}$	A	0.4001	0.1076	0.9896	$C(S)=0.04305S^{-1.1076}$	
	B	0.3746	0.0982	0.9864	$C(S)=0.03679S^{-1.0982}$	B	0.3988	0.1038	0.9889	$C(S)=0.04141S^{-1.1038}$	
	C	0.3754	0.0990	0.9850	$C(S)=0.03718S^{-1.0990}$	C	0.3760	0.1073	0.9939	$C(S)=0.04035S^{-1.1073}$	
30-40	D	0.3810	0.0953	0.9872	$C(S)=0.03632S^{-1.0953}$	D	0.3730	0.0975	0.9865	$C(S)=0.03638S^{-1.0975}$	
	E	0.3781	0.0843	0.9847	$C(S)=0.03188S^{-1.0843}$	E	0.4109	0.1053	0.9845	$C(S)=0.04328S^{-1.1053}$	

各土层不同处理土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量值见表 2。由表 2 可知,0-10 cm 与 10-20 cm 土层各处理土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量仅 CK 与其他处理存在显著差异。0-10 cm 各处理土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量大小依次为 CK>A>C>B>D>E,10-20 cm 土层各处理土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量大小依次为 CK>A>C>D>B>E。20-30 cm 土层 CK 与 C 处理分别与其他各处理均存在显著差异,各处理土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量大小依次为 CK>C>E>D>A>B。30-40 cm 土层土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量大小依次为 CK>E>A>B>C>D。总体来看,较深土层不同处理差异更为显著,这可能是由于小麦根系竞争机制以及垂直空间分布规律,使得不同种植密度小麦根系在不同土层分布差异导致的。在 0-20 cm 土层,随着种植密度的增大,土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量值减小,供水能力减弱。而在 20-40 cm 土层,较高种植密度逐渐显现出更强的供水能力。这与土壤水分特征曲线 Gardner 模型参数 B 所反映的结论基本一致。由表 2 还可以看到,不同土层 CK 比水容量值差异较小,而其他处理不同土层比水容量存在较明显的差异,且总体显现出随土层加深而增加的趋势。

表 2 不同处理 100 kPa 时的比水容量值 1/(10⁴ Pa)

处理	土层深度/cm			
	0-10	10-20	20-30	30-40
CK	2.8331a	2.9174a	2.9692a	2.9116a
A	2.2861b	2.3881b	2.4484c	2.6229bc
B	2.2149b	2.3402b	2.4221c	2.5670cd
C	2.2487b	2.3569b	2.6956b	2.4618cd
D	2.2105b	2.3411b	2.4756c	2.3217d
E	2.0162b	2.2237b	2.5186c	2.6647b

注:同列数据后相同字母表示差异不显著(显著水平为 0.05)。

2.3 土壤饱和含水量、毛管水含量及有效水含量

由图 2 可知:各土层不同处理饱和含水量呈现一定差异性,在试验范围内,随种植密度增大,饱和含水量呈现出先减少后增加的趋势,反映出土壤最大容水能力的差异。

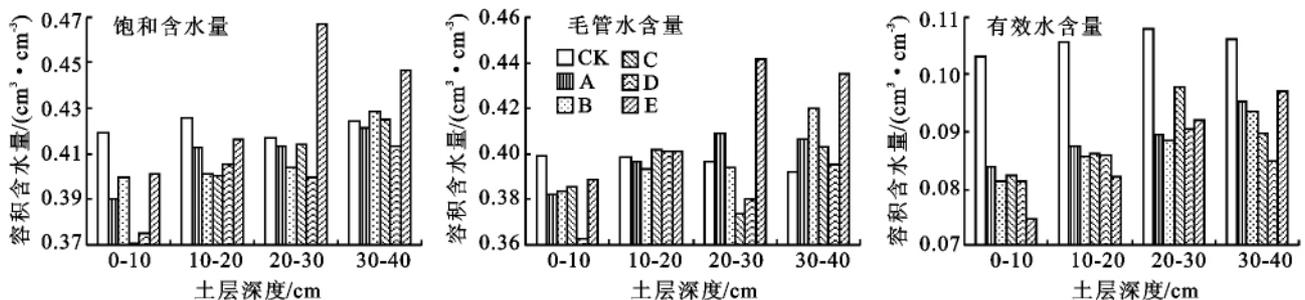


图 2 不同处理土壤饱和含水量、毛管水含量、有效水含量

毛管水对于保证植物用水的供给有很大的作用。不同处理土壤毛管水含量呈现出与土壤饱和含水量相似的规律,但在较深土层差异更为明显。0-20 cm 土层内随着种植密度的增大,土壤有效水含量依次递减;而在 20-40 cm 土层内有效水含量则随着种植密度的增大先减少后增加。造成不同处理的土壤饱和含水量、毛管水含量以及有效水含量差异的原因可能是不同处理的根系发育状况(根系密度、直径等)不同,在作物生长过程中根系对土体中的穿插挤压,使土壤孔隙发生不同程度改变。对三者影响程度的差异,则可能是根系对不同大

小孔隙影响程度不同所导致的。注意到同一种植密度下不同土层的土壤饱和含水量、毛管水含量以及有效水含量不尽相同,这可能与根系的垂直空间分布规律及其竞争机制有关。

4 结论与讨论

(1)由于小麦根系对土壤的机械作用,使不同处理土壤水分特征曲线呈现明显差异,在试验范围内随着种植密度的增大,相同吸力下土壤的持水量呈现先降低后增加的趋势。不同处理根系机械作用对土壤不同当量直径孔隙影响程度不同,使土壤水分特征曲线不同吸力段受到的影响存在差异。且由于根系的垂直分布规律和竞争机制等原因,在不同土层也存在一定差异。

(2)在0—20 cm 土层,土壤供水能力呈现随种植密度的增大而减弱的趋势。而在20—40 cm 土层,较高种植密度逐渐显现出更强的供水能力。不同土层比水容量总体显现出随土层加深而增加的趋势。

(3)在试验范围内,随着种植密度的增大,土壤饱和含水量和毛管水含量均呈现出先减少后增加的趋势。0—20 cm 土层内随着种植密度的增大,土壤有效水含量依次递减;而在20—40 cm 土层内有效水含量则随着种植密度的增大先减少后增加。由于根系的垂直分布规律,使不同土层的土壤饱和含水量、毛管水含量以及有效水含量不尽相同。

本文仅基于不同种植密度下的土壤水分特征曲线及土壤水力学特性分析了其变化,未能建立根系与土壤水分特征曲线的直接关系。为定量探讨作物根系对土壤孔隙及土壤水分特征曲线的影响,还需进一步对根系和土壤孔隙做定量测量与研究。

参考文献:

- [1] 朱首军. 渭北旱塬梯田土壤水分特征曲线的测定及分析[J]. 西北林学院学报,1999,14(4):23-26.
- [2] 孙迪,夏静芳,关德新,等. 长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1405-1409.
- [3] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [4] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [5] Imhoff S, Ghiberto P J, Grioni A, et al. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 268-274.
- [6] 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.
- [7] 宋自影,王飞,胡林,等. 根系对土壤机械压力影响的模拟试验[J]. 农业工程学报,2011,27(11):101-106.
- [8] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988:23-24.
- [9] Bengough A G, Mullins C E, Wilson G. Estimating soil frictional resistance to metal probes and its relevance to the penetration of soil by roots[J]. Eur. J. Soil Sci., 1997, 48(4): 603-612.
- [10] Gale M R, Grigal D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status[J]. Can. J. Forest Res., 1987, 17(8): 829-834.
- [11] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post-irrigation movement of soil water; 1. Redistribution[J]. Water Resour. Res., 1970, 6(3): 851-861.
- [12] 庄季屏,王伟. 土壤低吸力段持水性能及其与早期土壤干旱的关系研究[J]. 土壤学报,1986,23(4):306-313.

上接第104页

- [11] 尹勤瑞,张兴昌,王丹丹. 初始含水量对盐碱土饱和导水能力和盐分淋洗的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(3):71-74.
- [12] 庄文化,冯浩,吴普特,等. 2种高分子保水材料对土壤持水能力的影响[J]. 中国水土保持科学,2008,6(3):81-87.
- [13] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [14] Brodowski S, John B, Flessa H, et al. Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 539-546.
- [15] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 51(1/4): 33-65.
- [16] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.