

基于 HYDRUS 软件的植物混掺 土壤水分特征曲线分析

郑 健^{1,2}, 任倩慧¹, 赵廷红¹, 王 燕¹, 万吉祥¹

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探求植物混掺对土壤持水性产生的影响, 以甘肃景泰地区土壤为试验材料, 设置 1% 玉米芯、1% 玉米叶、3% 玉米芯、3% 玉米叶等不同比例、不同秸秆混掺物 4 种处理, 采用离心机法测定土壤水分特性曲线, 同时利用 HYDRUS 软件进行模拟计算。结果表明, 在相同吸力下, 相同混掺物处理, 混掺比为 3% 的土壤体积含水率高于混掺比为 1% 的土壤; 相同混掺比处理, 混掺玉米叶的土壤体积含水率高于混掺玉米芯的土壤, 且混掺处理后土壤体积含水率均高于纯土; 不同土壤水分特征曲线的模型拟合分析表明, 不同处理的最优拟合模型均为 Van Genuchten 模型。研究结果可为探索该地区植物混掺条件下土壤水盐运移规律提供一定参考。

关键词: 混掺物; 土壤水分特征曲线; 模型; HYDRUS

中图分类号: S152.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)05-0168-06

Analysis of soil water characteristic curve by mixed plants based on HYDRUS software

ZHENG Jian^{1,2}, REN Qian-hui¹, ZHAO Ting-hong¹, WANG Yan¹, WAN Ji-xiang¹

(1. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China)

Abstract: In order to explore the effect by mixed plants to soil water holding capacity, we have taken the soil from Jingtai, Gansu for the experimental material, set up four treatments with different plants mixed proportion (such as 1% corn cobs, 1% corn leaves, 3% corn cobs and 3% corn leaves), and use the centrifuge method to measure the soil water characteristic curve. At the same time, utilize the HYDRUS software to simulate and calculate. The results shown that: Under the treatment with same suction and mixed proportion, the soil volumetric water content with mixed proportion of 3% was higher than 1% soil; Under the same mixed proportion treatment, the soil volumetric water content mixed corn leaves was higher than mixed corn cobs soil, also the soil volumetric water content with all plants mixed treatments were total higher than the pure soil as without any mixed. Though the different model fitting analysis for the soil water characteristic curves, have indicated that the Van Genuchten model was the best fitting model for the four treatments. This research results can be provided a certain reference for exploring the rule of soil water and salt movement under plants mixed condition in this region.

Keywords: Plants addictive; soil water characteristic curve; model; HYDRUS

土壤水分特征曲线表示土壤水在非饱和状态下能态与数量间的关系, 是分析土壤水运动的最主要依据^[1]。土壤水分特征曲线的测定方法以测定法和

参数估计法为主, 直接测定法中又可分为实验室测定和田间测定, 其中较为常见的有: 张力计法、压力膜法、砂性漏斗法和离心机法等^[2]。近年来, 对于土

收稿日期: 2013-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51369014); 旱区农业水土工程教育部重点实验室访问学者基金; 兰州理工大学博士基金(0906ZXC121)

作者简介: 郑 健(1981—), 新疆阿克苏人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail: zhj16822@126.com。

壤水分特征曲线的研究多集中在模型参数的求解、分形理论(Turcotte, 1986^[3]; Bartoli 等, 1991^[4]; Tyler S W^[5])及空间变异性等方面。

土壤盐渍化能引起土壤物理和化学性质的改变,从而导致大部分作物生长环境的退化^[6]。在我国西北地区土地大面积盐渍化已成为影响灌溉农业可持续发展的重要问题^[7]。相关学者一直在寻求土壤盐渍化的原因^[8-9]及解决方法。秸秆还田技术是改善农田生态环境的重大措施,是促进绿色食品产业和农业可持续发展的有效手段^[10]。国外研究人员 Kasteel R、Sonnleitner R 和 Cabile S D M S 等研究表明,秸秆还田能有效改善土壤物理结构,提高土壤孔隙度,增加土壤的持水能力,同时有利于更新土壤有机质,保持和提高土壤有机质含量,增加土壤中营养元素的储量;粉碎过的作物秸秆在加入土壤后较长秸秆能迅速改良土壤结构,提高土壤结构的稳定性^[11-13]。

国内研究人员桥海龙(2006)^[14]等针对秸秆不同覆盖方式对土壤水盐运移的影响进行了研究,并通过土柱模拟实验的方法绘制了土壤水分特征曲线及盐分特性曲线,得出了较好结果;王燕(2010)^[15]等考虑了不同混掺物及不同混掺比例对土壤水分入渗过程的影响,并利用指数函数进行了拟合。王增丽等通过室内土柱培养试验对比研究了秸秆粉碎程度及秸秆不同 C/N 值对土壤持水特性的影响,结果表明各处理土壤持水能力差异不大,粉碎氮化秸秆能明显增强土壤耐旱性^[16]。但对秸秆混掺条件下土壤水分特征曲线的研究还未见报道。

本研究采用离心机法对不同混掺处理下的土壤水分特性曲线进行测定,分析植物混掺物对土壤水分特征曲线的影响规律,并利用 HYDRUS 软件对实验数据进行模拟,对比分析选取最优数学模型,为植物混掺土壤入渗研究提供基本数据资料,同时为解决我国西部地区土壤盐碱化问题提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土样采自甘肃省景泰县赵家水村附近荒地,土壤为粉质砂壤土,于阴凉通风处风干,粉碎后通过 2 mm 孔径的试验筛,放入新鲜土样袋中备用,粒径分配如表 1。

秸秆为甘肃省景泰县赵家水当地种植的玉米叶和玉米芯。风干后,将玉米叶处理成 1 cm × 1 cm 的方形叶片,玉米芯处理成 1 cm × 1 cm × 1 cm 的玉米芯颗粒。

表 1 供试土壤粒径分析

Table 1 Particle size analysis of test soil

粒径/mm Particle size	<2	<1	<0.05	<0.01	<0.001
含量/% Content	100	99.46	80.26	23.13	10.06

1.2 试验设计及方法

本试验设置玉米芯和玉米叶 2 种混掺物,依据前期的试验研究结果设置混掺比为 1% 和 3% (质量比),容重控制在 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,并以无秸秆混掺的纯土作为对照。设置不同的转速和时间换算成土壤吸力,吸力测定点为 0.01、0.1、0.3、0.5、0.8、1、3、5、7 bar。每个吸力对应一个土壤含水率。试验所用离心机(日立 CR21G,最高转速 21 000 rpm,最大离心加速度为 $48g$)配有特制环刀,并可保持恒温环境,从而排除温度对土壤水分特征曲线测定的影响。用特制环刀(容积 100 cm^3)装入土壤,通过电子称称重控制设计的土壤容重,随后浸水 24 h 以使饱和,浸泡饱和后称重,确定土壤饱和含水率。将饱和后的土样放入离心机内,设置离心机的转速和离心时间来确定对应的土壤吸力,离心结束后再放入烘箱内在 105°C 下烘 8 h,称重并计算土壤含水率,并换算成体积含水率,绘制土壤水分特征曲线。

2 结果与分析

2.1 混掺处理对土壤水分特征曲线的影响

试验测定出 4 种混掺处理及纯土在不同吸力下的土壤含水率,将土壤含水率换算为体积含水率的公式^[17]为:

$$\theta_v = \theta_g \gamma_c / \rho_w \quad (1)$$

式中, θ_v 为体积含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), γ_c 为土壤干容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), ρ_w 为水的密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), θ_g 质量含水率 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。这样就可绘制出以体积含水率为纵坐标的不同混掺处理下的土壤水分特征曲线,如图 1 所示。

由图 1 可以看出,在低吸力区域,不同混掺处理的土壤水分特征曲线的差异性较小,而随着吸力值的逐渐增大,各处理的土壤水分特征曲线间的差异呈增大趋势。在同一吸力下,混掺处理的体积含水率都大于纯土(景泰砂壤土)对照,在中高吸力段这种现象更为显著。原因是在低吸力范围内,土壤保持或排出水量主要取决于毛管力的作用和孔隙大小,而混掺物的加入起到了缩小孔隙的作用,提高了土壤的持水性。

将同种比例下不同混掺物种类的土壤水分特征曲线进行分析,结果如图 2 所示,在 1% 和 3% 两种混掺比例下,混掺玉米叶的土壤持水能力均强于混掺玉米芯处理。引起混掺玉米叶的土壤体积含水率较高的原因在于,玉米叶片状结构能够有效阻碍土壤水分运动,增强土壤持水能力。而在 1% 混掺比例下玉米叶和玉米芯的土壤水分特征曲线较为相似,3% 玉米叶和 3% 玉米芯的土壤水分特征曲线差距显著增大,也正是由于玉米叶混掺量较多所引起的,玉米叶混掺的越多,对水分运动的阻碍性越强,土壤的持水能力也就越强。

图 3 为相同混掺物不同混掺比例的土壤水分特征曲线提取对比图。在同一吸力下,混掺比例为 3% 的土壤体积含水率大于 1% 混掺比的土壤体积含水率。由于混掺物的加入使得土壤孔隙减小,土壤水分运动受到阻碍。而混掺比越大,这种阻碍作

用就越大,故 3% 混掺比的土壤持水能力要强于 1% 混掺比的土壤持水能力。

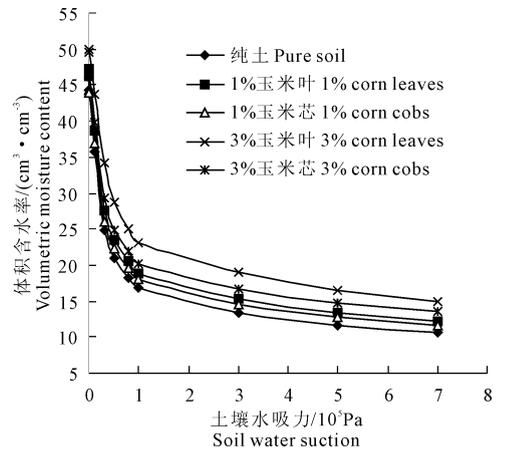
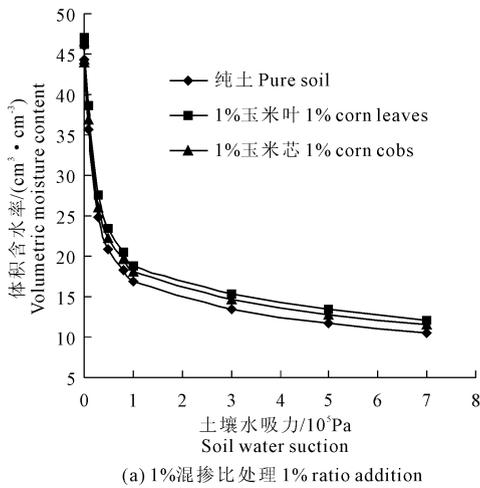
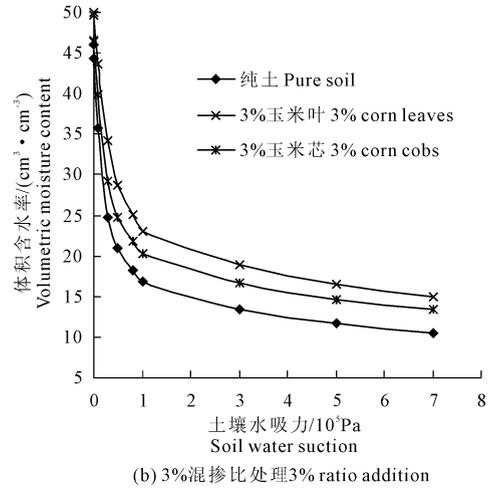


图 1 不同混掺处理下的土壤水分特征曲线

Fig.1 Soil water characteristic curves under different mixed treatments



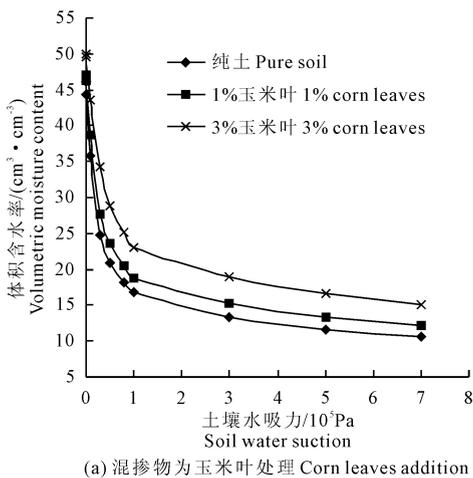
(a) 1%混掺比处理 1% ratio addition



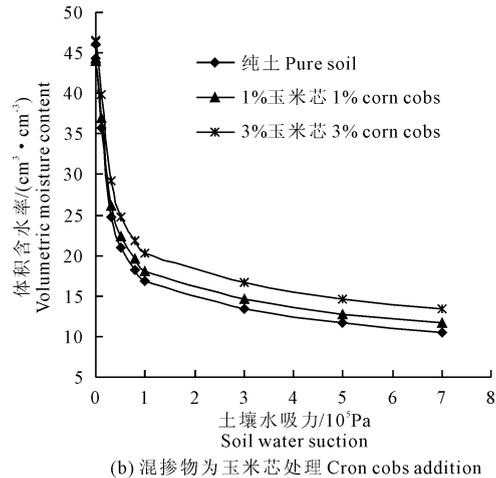
(b) 3%混掺比处理 3% ratio addition

图 2 同种比例下不同混掺物种类的土壤水分特征曲线

Fig.2 Soil water characteristic curves with different mixed plants under same proportion



(a) 混掺物为玉米叶处理 Corn leaves addition



(b) 混掺物为玉米芯处理 Cron cobs addition

图 3 相同混掺物不同混掺比例的土壤水分特征曲线

Fig.3 Soil water characteristic curves with different mixed proportion under same mixed plants

2.2 基于 HYDRUS 软件的模拟分析

HYDRUS 软件是由美国国家盐渍土改良中心 (US Salinity Laboratory) 开发的用于模拟变量饱和和多孔介质中水分、能量、溶质运移的新型数值模型软件^[18]。它拥有多种数学模型,可以灵活处理各种水流边界^[19],能够较好地模拟水分、溶质与能量在土壤中的分布,时空变化,运移规律,在分析人们普遍关注的农田灌溉、田间施肥、环境污染等实际问题应用较为广泛。

HYDRUS 软件包括 HYDRUS 主程序模块、Project Manager 模块、TIME 模块、PARAMETER 模块、BOUNDARY 模块、HYDRUS-1D 模块及 GRAPHICS 模块等 7 个基本模块^[20]。并设有以单孔及多孔分类的多个数学模型。其中应用较广的有 van genuchten 模型及其修正模型、Dual-porosity 模型、Brooks-Corey 模型和 Log normal distribution 模型等。

2.2.1 常用土壤水分特征曲线模型

本文选用应用最为广泛的土壤水分特征曲线模型:Van Genuchten 模型、Brooks and Corey 模型、Log normal distribution 模型进行拟合分析。

1) Van Genuchten 模型^[21]。

VG 模型由美国学者 Van Genuchten 于 1980 年提出,其表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (ah)^n]^m} \quad (2)$$

式中, θ 为体积含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_r 为残留含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_s 为饱和含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为负压 ($\text{cm H}_2\text{O}$); a, n, m 为经验拟合参数 (或曲线性状参数); $m = 1 - 1/n$ 。

2) Brooks-Corey 模型^[22]。

Brooks-Corey (1964) 模型可写为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} (ah)^{-\lambda} & ah > 1 \\ 1 & ah \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, S_e 是饱和度, θ 是体积水分含量 ($\text{L}^3 \cdot \text{L}^{-3}$), θ_r 和 θ_s 分别为剩余水分含量和饱和水分含量 ($\text{L}^3 \cdot \text{L}^{-3}$); h 是压力水头 (L); λ 是土壤孔隙尺寸分布参数,影响土壤水分特征曲线的斜率。

3) Log normal distribution 模型^[23]。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{\ln(h/h_0)}{\sqrt{2}\sigma} \right\} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, h_0 为进气值 α 的倒数, σ 为土壤孔隙尺寸分布参数,二者均是影响土壤水分特征曲线形态的经验参数。

2.2.2 土壤水分特征曲线的拟合分析 应用 HYDRUS 软件中的不同模型对各实测土壤水分特征曲线进行拟合,确定土壤水分特征曲线的模型参数,通过模型计算出实测土壤水吸力对应的土壤含水率,并与实测值对比分析。同时,采用 SPSS 软件检测其相应性,结果如表 2 所示。

表 2 不同处理各拟合统计特征值

Table 2 The fitting statistic eigenvalues under different treatments

处理 Treatments	拟合模型 Fitting models	相关系数 Correlation Coefficients	残差平方和 Sum of square residuals	F	P
纯土 Pure soil	VG	0.9994	1.061	6890.233	0.001
	BC	0.9814	18.501	183.080	0.001
	Log	0.9947	10.925	662.863	0.001
1% 叶 1% corn leaves	VG	0.9991	1.331	6732.260	0.001
	BC	0.9829	26.720	200.547	0.001
	Log	0.9932	14.645	513.399	0.001
3% 叶 3% corn leaves	VG	0.9987	2.014	4049.049	0.001
	BC	0.9899	33.338	343.004	0.001
	Log	0.9931	15.929	505.790	0.001
1% 芯 1% corn cobs	VG	0.9993	1.287	5339.923	0.001
	BC	0.9935	23.744	780.005	0.001
	Log	0.9955	12.727	533.724	0.001
3% 芯 3% corn cobs	VG	0.9991	1.348	5395.226	0.001
	BC	0.9914	27.760	402.959	0.001
	Log	0.9928	14.870	482.614	0.001

注:相关系数是衡量两个事物相似程度的数字,其绝对值在 0 至 +1 间,相关系数的绝对值越接近 1,两相关变量的相关度越好;残差平方和表示随机误差的效应,其值越小,表示数据间的相关性越好;F 值为回归模型的显著性检验,F 值越大,模型既显著相关;P 值为相伴概率,当其小于显著水平 0.05 时,模型表现为显著相关。

由表 2 可知各处理 P 值均小于 0.05, 故拟合效果较好, 其他统计特征值可用于最优模型的选取。通过相关系数、残差平方和以及 F 值的比较, 结果显示在各个处理中 VG 模型的拟合效果最好, 其相关系数均为 0.999, 与实验值具有很高的相关度。而在三个模型中 BC 模型的模拟效果最差, 这主要

是由于 BC 模型形式简单, 应用范围较窄, 对于添加混掺物的新型土壤进行模拟时, 其参数易产生较大误差; 而 VG 模型可适用土壤质地范围较宽, 同时可以使饱和和土壤吸力为 0, 能更好地契合实验数据, 故模拟效果较好。

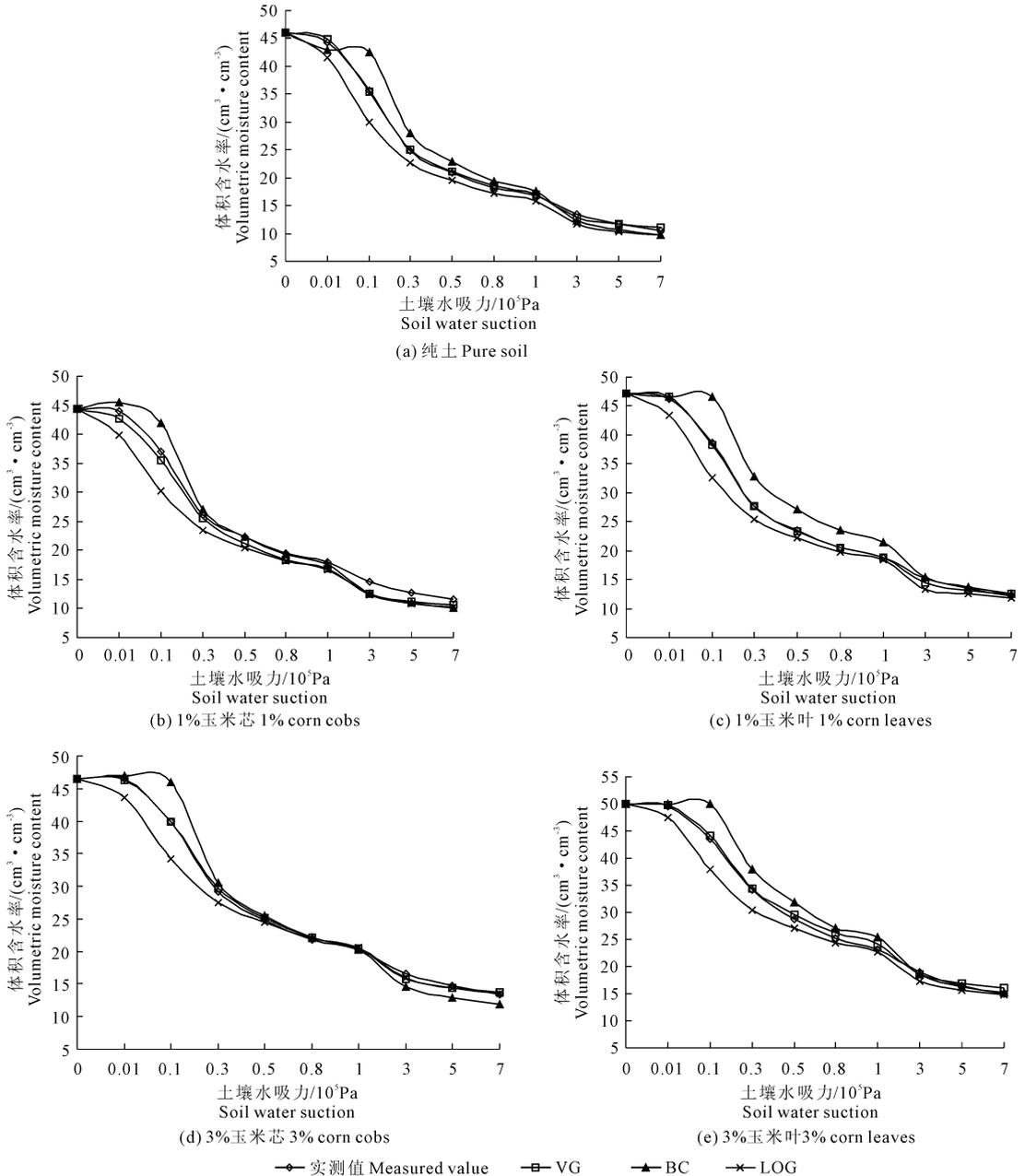


图 4 不同处理下各模型拟合曲线对比

Fig.4 The comparison charts of model fitting curves under different treatments

不同处理在不同模型下的拟合效果如图 4 所示 (为了能够清楚表现各拟合曲线间的差异性, 使任意两设计吸力值之间的长度间隔为一个单位, 绘制数值曲线坐标图), VG 模型模拟的土壤水分特性曲线与实验所得曲线基本重合; 对于三种模型, 高吸力区

的拟合效果均优于低吸力区; 不同混掺比下, 混掺比较低的处理模拟效果更优; 不同混掺物下, 添加玉米芯的处理模拟效果更优。混掺物的加入改变了土壤的持水特性, 其水力特性参数需通过实验进行测定, 而在实验测定过程中由于人为及观测误差等因素造

成水力特性参数准确度下降,最终使模拟结果产生一定偏差。

3 小 结

本试验通过实验及模拟的方法对不同混掺处理下土壤水分特征曲线的变化情况进行了研究,并选取了最优拟合模型。得出结论如下:

1) 土壤持水能力主要取决于毛管力和孔隙大小,秸秆混掺物的添加起到了减小孔隙的作用,因此各项处理均呈现出含水率增大,持水力增强的现象;随着所添混掺物阻碍能力的增大,其变化的差异性越大。混掺比为 3% 的土壤持水能力大于 1% 的处理,添加玉米叶的土壤持水能力大于添加玉米芯的处理,各项处理在同吸力下体积含水率均大于纯土。

2) 利用 HYDRUS 软件的不同拟合模型进行拟合,并分析相关性检测参数(相关性系数、残差平方和、 F 值、 P 值),可知最优拟合模型均为 van Genuchten 模型,且呈现低混掺比拟合效果优于高混掺比拟合效果、玉米芯混掺处理拟合效果优于玉米叶混掺处理的现象。

混掺物的添加对于土壤特性的改善起到了一定的促进作用,VG 模型的拟合结果基本与试验数据相符,因此,利用 HYDRUS 软件对土壤水盐运移过程进行模拟是一项切实可行的方法。土壤水分特征曲线是研究土壤水分运动的最主要依据,土壤水力参数又直接决定了土壤水分特征曲线的准确性。土壤水力参数测定产生的偏差,必然对土壤入渗的研究产生一定的影响。因而如何更准确的获得不同土壤的水力参数,将成为未来土壤入渗模拟研究的重要课题。

参 考 文 献:

[1] 刘洪波,张江辉,虎胆·吐马尔白,等.土壤水分特征曲线 VG 模型参数求解对比分析[J].新疆农业大学学报,2011,34(5):437-441.

[2] 来剑斌,王全九.土壤水分特征曲线模型比较分析[J].水土保持学报,2003,17(1):137-140.

[3] Turcotte D L. Fractals and fragmentation[J]. J Geophysical Res, 1986,91(B2):1921-1926.

[4] Bartoli F, Philippon R, Doirisse M, et al. Silty and sandy soil structure

and self-similarity: The fractal approach[J]. J Soil Sci, 1991, 42: 167-185.

[5] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Sci Soc Am J, 1989, 53: 987-996.

[6] Qadir M, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration Strategies for Saline Soils[J]. Land Degradation and Development, 2000, 11: 501-521.

[7] Konukcu F, Gowin J W, Rose D A. Dry drainage: a sustainable solution to water logging and salinity problems in irrigation areas? [J]. Agricultural water management, 2006, 83(12): 1-12.

[8] 刘志远.不同外界条件对土壤入渗性能影响研究[J].山西林业,2008,(5):23-25.

[9] 王全九,汪志荣,张建丰,等.层状土入渗机制与数学模型[J].水利学报,1998,(s1):76-79.

[10] 龚振平,杨悦乾.作物秸秆还田技术与机具[M].北京:高等教育出版社,2012.

[11] Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation[J]. Geoderma, 2007, 137(3/4): 360-369.

[12] Sonnleitner R, Lorbeer E, Schinne F. Effects of straw, vegetable oil and whey on physical and microbiological properties of a chernozem [J]. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 195-204.

[13] Cabile S D M S, Angeles O R, Johnson-Beebout S E, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(2): 211-216.

[14] 乔海龙,刘小京,李伟强.秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响[J].土壤通报,2006,37(5):885-889.

[15] 王燕,郑建,冀宏,等.植物混掺物对甘肃景泰砂壤土入渗过程的影响[J].农业机械学报,2010,41(1):63-67.

[16] 王增丽,王珍,冯浩.秸秆粉碎氮化还田对土壤体积质量及持水特性的影响[J].农业工程学报,2011,27(11):211-215.

[17] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:4-5.

[18] 郭瑞,冯起.土壤水盐运移模型研究进展[J].冰川冻土,2008,30(5):527-534.

[19] 马增辉,韩雯昌,解建仓,等.基于 HYDRUS 3D 的陕西卤泊滩水盐运移建模方法研究[J].陕西农业科学,2011,(1):62-66.

[20] Simunek J, Genuchten M T, Sejna M. Hydrus: model use, calibration, and validation[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2012, 55(4): 1261-1274.

[21] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society America Journal, 1980, 44(5): 892-898.

[22] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media, Hydrology Paper 3[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.

[23] Burner W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure [J]. Water Resources Research, 1994, 30(2): 211-223.