doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.017

植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析*

郑　健[1]　王　燕[1]　蔡焕杰[2]　万吉祥[1]　李志军[2]

(1.兰州理工大学西部能源与环境研究中心，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能力的影响，通过测定不同土壤容重、不同混掺物及混掺比例条件下的土壤水分特征曲线，分析植物混掺物对土壤持水能力的影响，并利用 RETC 软件结合统计分析确定不同处理的模型适宜性。结果表明，相同土壤水吸力下，添加植物混掺物处理的土壤含水率均高于纯土处理；添加 3% 植物混掺物的处理中，玉米叶的保水效果优于玉米芯，而添加 1% 植物混掺物的处理中两者差异较小；低吸力阶段，混掺物的添加减少了土壤中大孔隙的比例，而在中高吸力阶段，混掺物的添加增大了土壤中小孔隙的比例，进而提高土体的持水能力。模型适宜性分析结果表明，各处理最优模型的非饱和导水率模式均为 Mualem 模型；土壤容重为 1.35g/cm^3 和 1.40g/cm^3，混掺比例为 1% 和 3% 的玉米叶处理时，最优模型分别为 VGM(m,1/n)和 VGM(m,n)，混掺比例为 1% 和 3% 的玉米芯处理时，最优模型分别为 BCM 和 VGM(m,1/n)。

关键词：混掺物　土壤水分特征曲线　土壤孔隙　拟合模型

中图分类号：S152.7；S154.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2014)05-0107-06

引言

土壤水分特征曲线是表征土壤水吸力随土壤含水率变化的关系曲线，能反映土壤水的能量与数量间的关系[1]，有关学者[2-7]已对其进行了系统研究。土壤水分和溶质运移动力学模拟研究中，土壤水分特征曲线资料是必不可少的[8-11]，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[12-14]。

秸秆还田技术是改善农田生态环境、现代灌溉农业、旱作农业的重大措施，是节本增效型农业的重要技术支撑，也是促进绿色食品产业和农业可持续发展的有效手段[15]。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[16-18]。王燕等研究表明：添加一定比例混掺物的土体能有效延长水分对耕层土壤的湿润，增大水分在耕层的滞留时间；混掺 3% 玉米叶和 1% 玉米叶的处理能够有效提高耕层土壤含水率[19]。王珍等研究结果表明：长秸秆处理加入土壤后显著降低土壤入渗能力；粉碎氨化后的秸秆较对照处理及粉碎秸秆处理能显著增加土壤稳定入渗率、土壤累积入渗量；各种处理土壤持水能力差异不明显[20]。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 比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，粉碎氨化秸秆能明显增强土壤耐旱性[21]。而秸秆混掺条件下土壤水分特征曲线的研究还未见报道。同时，由于尚不能根据土壤的基本性质从理论上得出土壤水的基质势与土壤含水率的关系，为了分析应用的方便，常用实测结果拟合出经验关系[22]。目前，拟合土壤水分特征曲线的模型主要有：van Genuchten 模型及其修正模型，Brooks and Corey 模型、Dual-porosity 模型、Lognormal Distribution 模型[23]等，其中 Brook and Corey 模型和 van Genuchten 及其修正模型的应用最为广泛。但对于植物混掺条件下的模型适宜性及拟合优度比较，国内外文献中尚未见报道。

本文采用离心机法测定不同土壤容重、不同混掺物及混掺比例条件下的土壤水分特征曲线，分析植物混掺物对土壤水分特征曲线的影响，并通过分析植物混掺对土壤中孔隙分布状况的影响揭示植物混掺对土壤持水能力的影响机理。同时，利用

收稿日期：2013-06-24　修回日期：2013-07-28

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

作者简介：郑健，副教授，博士，主要从事农业水土工程研究，E-mail：zhj16822@126.com

RETC 软件结合统计分析确定不同处理的模型适宜性,以期为干旱区秸秆还田对土壤水、盐运移的影响提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点开放实验室内进行。试验土壤采自甘肃省景泰地区,土壤风干后过 2 mm 筛备用,并采用土壤筛进行土壤粒径分析,其粒径小于 2 mm 的质量分数为 100%,粒径小于 1 mm 的为 99.46%,粒径小于 0.05 mm 的为 80.26%,粒径小于 0.01 mm 的为 23.13%,粒径小于 0.001 mm 的为 10.06%。按照中国土壤分类标准,供试土壤属于砂壤土,俗称黄绵土。试验所用混掺物为在西北地区种植面积最大、易获得、腐烂后可增加土壤肥力的玉米芯和玉米叶,将玉米芯风干后粉碎成 2 cm × 2 cm × 2 cm 尺寸,玉米叶风干后粉碎成 2 cm × 2 cm 尺寸备用。

1.2 试验设计及方法

设置土壤干容重为 1.35 g/cm^3 和 1.40 g/cm^3,植物混掺比例设置 1% 和 3%(质量分数),所用混掺物为玉米芯和玉米叶,并以相同土壤容重的纯土作为对照试验。

试验采用高速恒温冷冻离心机(日立 CR21G 型)测定土壤水分特征曲线,将准备好的试验材料按设定处理均匀装填于 4 套土壤水分特征曲线测定装置,并在试验开始前将其置于水中进行饱和处理,试验结束后放入干燥箱于 105℃下干燥 8 h,称量并计算土壤含水率。每处理重复 2 次,取平均值作为结果。离心机法比其他方法操作简单、省时,可测定较宽的吸力范围,但离心机法在测定土壤持水特征过程中容重随转速(吸力)会发生明显的变化。针对变容重对土壤水分特征曲线测定产生的影响,本文通过确定土壤持水特征测定过程中容重变化的"三点法"解决离心机测定土壤水分特征曲线的容重校正问题[24]。

2 结果与分析

2.1 植物混掺物对土壤水分特征曲线的影响

试验测得不同处理土壤水分特征曲线如图 1 所示。由图可知:在低吸力阶段,各处理土壤含水率下降较快,土壤水分特征曲线较陡,随土壤水吸力逐渐增大,曲线呈现变缓趋势,且各处理土壤水分特征曲线间的差异明显;在相同土壤水吸力,各添加植物混掺物处理的土壤含水率均高于纯土处理;添加 3% 植物混掺物处理的土壤保水性明显优于添加 1% 植物混掺物处理;添加 3% 植物混掺物的处理中,玉米叶的保水效果优于玉米芯,在添加 1% 植物混掺物的处理中两者差异不大。上述结果表明在土壤中添加一定比例的植物混掺物可以提高土壤的保水能力。初步分析其形成原因,在低吸力阶段,土壤含水率减小较快,排水主要在大孔隙中进行;随着吸力增大,水分特征曲线逐渐变缓,土体排水也由大孔隙排水转为中小孔隙排水;在吸力较高阶段,只有小孔隙中能保留部分水分,土体对水分吸持能力较强,土壤含水率变化较小,曲线形态趋于平缓。各混掺物处理之间呈现差异,说明植物混掺物的加入对土壤孔隙大小分布有一定影响,提高了土壤的保水能力。

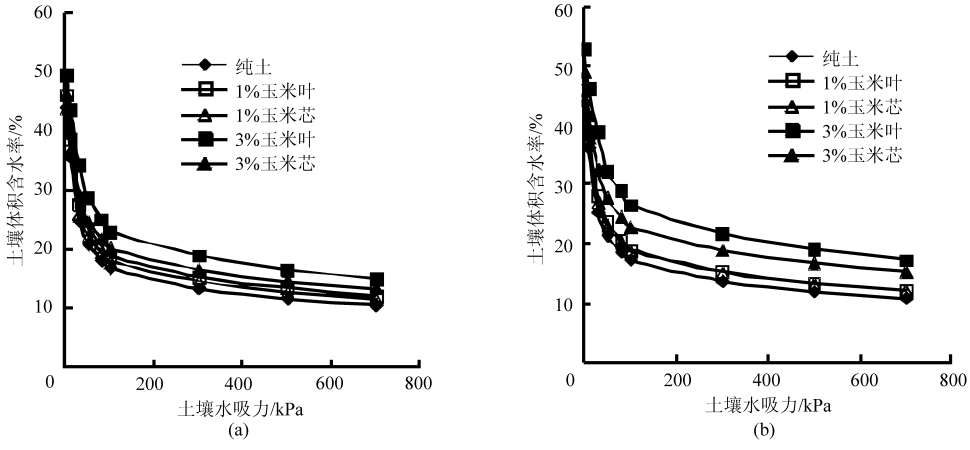

图 1 不同处理土壤水分特征曲线

Fig. 1 Soil water characteristic curves under different treatments

(a) 土壤容重 1.35 g/cm^3 (b) 土壤容重 1.40 g/cm^3

2.2 植物混掺物对土壤孔隙分布的影响

土壤中孔隙的大小及分布,对于分析土壤中水分的保持和运动具有重要意义。为进一步探明植物混掺物对土壤持水性的影响机理,本文对各处理土壤孔隙大小分布进行了分析。试验测得不同处理土壤水分特征曲线如图 1 所示。若将土壤中的孔隙设

想为各种孔径的圆形毛管，那么土壤水吸力 s 和毛管直径 d 的关系可表示为

$$s = 4\delta/d \quad (1)$$

式中，δ 为水的表面张力系数，室温条件下一般为 7.5×10^{-4} N/cm。区别于真实孔径，将 d 称为当量孔径。若吸力 s 的单位为 Pa，当量孔径 d 以毫米(mm)计，则当量孔径 d 与吸力 s 的关系可以用 $d = 300/s$ 表示[1]。将土壤水吸力单位换算为 Pa，根据式(1)计算出当量孔径，就可反映不同处理土壤中孔隙大小的分布。若土壤含水率 θ_1 对应的当量孔径为 d_1，含水率 θ_2 对应的当量孔径为 d_2，则土壤中孔径在 d_2 与 d_1 之间的孔隙所占的体积与孔隙总体积之比为 $\theta_1 - \theta_2$ $(\theta_1 > \theta_2)$[1]。因此，可根据不同处理土壤孔隙大小分布的状况，分析不同处理土壤持水能力的变化。

本试验中土壤水吸力对应当量孔径分别为 0.3、0.03、0.01、0.006、0.003 8、0.003、0.001、0.000 6、和 0.000 4 mm。为便于分析，将当量孔径按试验土壤水吸力设定值分为低吸力段、中吸力段和高吸力段，对应当量孔径为 0.03 mm 以上、0.003 8 ~ 0.03 mm 和 0.000 4 ~ 0.003 8 mm。通过对表 1 的数据分析可得：在低吸力阶段，即当量孔径大于 0.03 mm 时，纯土处理的孔隙所占体积与孔隙总体积之比均高于添加混掺物处理，分别达到 10.26%(1.35 g/cm^3)和 9.10%(1.40 g/cm^3)，说明在该试验吸力范围内混掺物的添加减少了土壤中大孔隙的比例，进而提高土体的持水能力；在中、高吸力阶段，即当量孔径 0.003 8 ~ 0.03 mm 和 0.000 4 ~ 0.003 8 mm 范围时，纯土处理的孔隙所占体积与孔隙总体积之比均低于添加混掺物处理，说明在该试验吸力范围内混掺物的添加增大了土壤中小孔隙的比例，从而提高土体的持水能力；从孔隙分布状况可看出，不同混掺物处理中，玉米叶处理的持水能力高于玉米芯处理；在不同添加比例处理中 3% 添加比例的持水能力均高于 1% 添加比例。分析结果表明土壤的当量孔径越大，土壤持水能力越弱，反之，土壤的当量孔径越小，土壤持水能力越大。因此，可以通过在土壤中添加一定比例的植物混掺物来提高土壤中、小孔隙的比例，进而增强土体的持水能力。

表 1　不同处理当量孔径分布比例

Tab. 1　Equivalent diameter distributions of soil pore under different treatments　%

当量孔径/mm	1.35 g/cm^3					1.40 g/cm^3				
	纯土	1%玉米叶	1%玉米芯	3%玉米叶	3%玉米芯	纯土	1%玉米叶	1%玉米芯	3%玉米叶	3%玉米芯
>0.03	10.26	8.45	7.38	6.35	6.59	9.10	8.20	7.67	7.02	6.72
0.003 8 ~ 0.03	16.50	17.74	17.35	18.52	18.05	16.63	18.16	17.71	18.42	18.30
0.000 4 ~ 0.003 8	7.70	8.40	8.04	10.11	8.50	7.94	8.69	8.18	11.86	9.34

2.3　不同处理最优土壤水分特征曲线拟合模型

2.3.1　常用土壤水分特征曲线拟合模型

本文选取应用最为广泛土壤水分特征曲线拟合模型：Brook and Corey 模型和 van Genuchten 模型。

(1) van Genuchten 模型(简称 VG 模型)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geqslant 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中　$\theta(h)$——土壤体积含水率

θ_s——土壤饱和体积含水率

θ_r——残余土壤体积含水率

h——负压，m　　α——进气值的倒数

m、n——不相关参数，是土壤孔隙尺寸分布参数

$m = 1 - 1/n$ 或 $m = 1 - 2/n$，α、m、n 均是影响土壤水分特征曲线形态的经验参数。

(2) Brooks and Gorey 模型(简称 BC 模型)

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

式中　S_e——饱和度

λ——土壤孔隙尺寸分布参数，影响土壤水分特征曲线的斜率

美国国家盐改中心提供的 RETC 软件中包含了不同土壤水分特征曲线模型(经验公式)，用以拟合实测试验数据，分析或预测非饱和土壤的水力性质。软件在选择水分特征曲线模型时，也要选择不同的求解 K(土壤非饱和导水率)的 Mualem 或 Burdine 模型。因此，描述土壤水力参数的模型组合共有 6 种，对应简写为：VGM(m,n)、VGM(m,1/n)、BCM、VGB(m,n)、VGB(m,2/n)、BCB。

2.3.2　植物混掺条件下不同土壤水分特征曲线拟合比较

应用 RETC 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

模型参数,通过模型计算出实测土壤水吸力所对应的含水率,并与实测值对比。各处理不同模型计算值与实测值拟合统计特征如表 2 所示。各处理不同模型对应 P 值均小于 0.01,拟合效果较好,从其他统计特征值分析可得拟合不同处理的最优模型。

表 2 不同处理各模型拟合统计特征值

Tab.2 Statistic eigenvalues of fitting models under different mineralization treatments

土壤容重/(g·cm^{-3})	混掺物及比例	拟合模型	相关系数	残差平方和	F	P	土壤容重/(g·cm^{-3})	混掺物及比例	拟合模型	相关系数	残差平方和	F	P
1.35	1%玉米叶	VGM(m,n)	0.966 2	0.030 1	1 128	0.000 1	1.40	1%玉米叶	VGM(m,n)	0.968 1	0.025 1	1 483	0.000 1
		VGM(m,1/n)	0.969 7	0.024 2	1 946	0.000 1			VGM(m,1/n)	0.966 7	0.023 8	1 687	0.000 1
		BCM	0.966 0	0.029 8	1 884	0.000 1			BCM	0.956 5	0.031 5	1 353	0.000 1
		VGB(m,n)	0.952 2	0.031 8	992	0.000 1			VGB(m,n)	0.965 2	0.031 5	1 353	0.000 1
		VGB(m,2/n)	0.952 6	0.030 9	1 026	0.000 1			VGB(m,2/n)	0.964 9	0.025 9	1 483	0.000 1
		BCB	0.945 0	0.040 8	886	0.000 1			BCB	0.958 1	0.030 7	1 574	0.000 1
	3%玉米叶	VGM(m,n)	0.920 9	0.056 8	992	0.000 1		3%玉米叶	VGM(m,n)	0.945 3	0.039 6	1 024	0.000 1
		VGM(m,1/n)	0.932 6	0.051 0	1 065	0.000 1			VGM(m,1/n)	0.936 5	0.049 8	1 008	0.000 1
		BCM	0.925 0	0.052 8	918	0.000 1			BCM	0.935 8	0.051 2	835	0.000 1
		VGB(m,n)	0.922 9	0.056 1	775	0.000 1			VGB(m,n)	0.931 0	0.045 3	938	0.000 1
		VGB(m,2/n)	0.923 4	0.058 1	842	0.000 1			VGB(m,2/n)	0.927 1	0.052 1	778	0.000 1
		BCB	0.918 8	0.059 0	668	0.000 1			BCB	0.918 1	0.063 6	638	0.000 1
	1%玉米芯	VGM(m,n)	0.968 1	0.025 1	1 458	0.000 1		1%玉米芯	VGM(m,n)	0.958 3	0.030 5	1 092	0.000 1
		VGM(m,1/n)	0.958 0	0.028 6	1 471	0.000 1			VGM(m,1/n)	0.959 1	0.029 7	1 158	0.000 1
		BCM	0.969 7	0.024 2	1 682	0.000 1			BCM	0.958 4	0.030 1	1 096	0.000 1
		VGB(m,n)	0.963 3	0.026 8	1 629	0.000 1			VGB(m,n)	0.953 0	0.031 2	917	0.000 1
		VGB(m,2/n)	0.959 2	0.029 7	1 578	0.000 1			VGB(m,2/n)	0.949 1	0.033 6	1 068	0.000 1
		BCB	0.959 0	0.029 5	963	0.000 1			BCB	0.949 0	0.035 8	902	0.000 1
	3%玉米叶	VGM(m,n)	0.927 8	0.059 1	768	0.000 1		3%玉米叶	VGM(m,n)	0.910 1	0.069 8	834	0.000 1
		VGM(m,1/n)	0.919 2	0.0607	754	0.000 1			VGM(m,1/n)	0.921 6	0.057 4	908	0.000 1
		BCM	0.929 0	0.058 3	868	0.000 1			BCM	0.911 6	0.063 8	758	0.000 1
		VGB(m,n)	0.925 3	0.060 5	731	0.000 1			VGB(m,n)	0.915 2	0.069 2	849	0.000 1
		VGB(m,2/n)	0.918 0	0.064 2	818	0.000 1			VGB(m,2/n)	0.913 8	0.066 1	828	0.000 1
		BCB	0.906 1	0.071 8	662	0.000 1			BCB	0.906 5	0.074 8	771	0.000 1

(1) 土壤容重 1.35 g/cm^3,混掺物及比例为 1% 和 3% 玉米叶处理,VGM(m,1/n)模型所对应的相关系数最高,残差平方和最小、F 值最大,模拟效果最好;混掺物及比例为 1% 和 3% 玉米芯处理,BCM 模型所对应的相关系数最高,残差平方和最小、F 值最大,模拟效果最好。土壤容重 1.40 g/cm^3,混掺物及比例为 1% 和 3% 玉米叶处理,VGM(m,n)模型所对应的相关系数最高,残差平方和最小、F 值最大,模拟效果最好;VGM(m,1/n)模型所对应的相关系数最高,残差平方和最小、F 值最大,模拟效果最好。

(2) 各模型 1% 混掺比例的拟合效果均高于 3% 混掺比例处理,初步分析是因为土壤水分特征曲线的实测过程中数据测定点偏少,造成土壤孔隙尺寸分布参数不准确,而混掺比例的提高对土壤孔隙尺寸分布参数的影响较大。

(3) 各处理最优模型的非饱和导水率模式均为 Mualem 模型,与 Mualem 或 Burdine 模型结合的 BC 模型对不同处理土壤水分特征曲线拟合无明显差异。

van Genuethen 曾对 Mualem 模型及 Burdine 模型进行比较,多数情况下 Mualem 模型对试验数据的拟合效果好于 Burdine 模型[25]。从模型参数含义可知,van Genuchten 模型适用于吸湿曲线,Brooks and Gorey 模型适用于脱湿曲线,但由于两种模型在实际应用中各具特点,如 Brooks and Gorey 模型形式简单,便于推求描述土壤水分运动模型和确定土壤水分运动参数的简单方法,而 van Genuchten 模型适用土壤质地范围比较宽,同时可以使饱和土壤吸力为零,符合吸湿过程中土壤吸力变化特点,因此两模型在实际应用中没有严格区别脱湿和吸湿过程。对比各模型,VG 模型的拟合效果较稳定,适应范围更广些,当前较多研究也表明这点。就笼统分类而言,文中所述模型均为唯象(Phenomenological)模型,目前尚无理想的数学模型可以从机理上全面描述土壤水分特征曲线[26],故不同模型对各矿化度处理的适用性,从机理上解释也就较为困难。

3 结论

（1）相同土壤水吸力下，添加植物混掺物处理的土壤含水率均高于纯土处理；添加 3% 植物混掺物处理的土壤保水性明显优于添加 1% 植物混掺物处理；在添加 3% 植物混掺物的处理中，玉米叶的保水效果优于玉米芯，在添加 1% 植物混掺物的处理中两者差异不大。

（2）低吸力阶段，混掺物的添加减少了土壤中大孔隙的比例，进而提高土体的持水能力；中高吸力阶段，混掺物的添加增大了土壤中小孔隙的比例，进而提高土体的持水能力；从孔隙分布状况可看出，不同混掺物处理中，玉米叶处理的持水能力高于玉米芯处理；在不同添加比例处理中 3% 添加比例的持水能力均高于 1% 添加比例。

（3）土壤容重 1.35 g/cm^3，混掺物及比例为 1% 和 3% 玉米叶处理时，VGM(m,1/n)模型效果最好；混掺物及比例为 1% 和 3% 玉米芯处理，BCM 模型效果最好。土壤容重 1.40 g/cm^3，混掺物及比例为 1% 和 3% 玉米叶处理时，VGM(m,n)模型效果最好；混掺物及比例为 1% 和 3% 玉米芯处理，VGM(m,1/n)模型效果最好。

（4）各模型 1% 混掺比例的拟合效果均优于 3% 混掺比例处理；各处理最优模型的非饱和导水率模式均为 Mualem 模型，与 Mualem 或 Burdine 模型结合的 BC 模型对不同处理土壤水分特征曲线拟合无明显差异。

参 考 文 献

1 雷志栋，杨诗秀，谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京：清华大学出版社，1988：18 - 24.

2 Thyagaraj T, Rao S M. Influence of osmotic suction on the soil water characteristic curves of compacted expansive clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12): 1695 - 1702.

3 Thakur V K S, Sreedeep S, Singh D N. Parameters affecting soil-water characteristic curves of fine-grained soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(4): 521 - 524.

4 Oh S, Lu N, Kim Y k, et al. Relation between the soil water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from residual soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(1): 47 - 57.

5 邵孝侯，王宇，毕利东，等. 基于最优分割理论的土壤水分有效性评价[J]. 农业工程学报，2010，26(3)：106 - 111.
Shao Xiaohou, Wang Yu, Bi Lidong, et al. Evaluation on soil water validity using optimum partitioning clustering method[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 106 - 111. (in Chinese)

6 房全孝. 根系水质模型中土壤与作物参数优化及其不确定性评价[J]. 农业工程学报，2012，28(10)：118 - 123.
Fang Quanxiao. Optimizing and uncertainty evaluation of soil and crop parameters in root zone water quality model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 118 - 123. (in Chinese)

7 刘继龙，马孝义，张振华，等. 基于联合多重分形的土壤水分特征曲线土壤传递函数[J]. 农业机械学报，2012，43(3)：51 - 56.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua, et al. Pedotransfer functions of soil water retention curve based on joint multifractal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 51 - 56. (in Chinese)

8 Zhai Q, Rahardjo H. Determination of soil-water characteristic curve variables[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 42(1): 37 - 43.

9 王俊，黄岁樑. 土壤水分特征曲线模型对数值模拟非饱和渗流的影响[J]. 水动力学研究与进展，A 辑，2010，25(1)：16 - 22.
Wang Jun, Huang Suiliang. Effect of soil water characteristic models on numerical modeling of unsaturated flow[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(1): 16 - 22. (in Chinese)

10 胡振琪，张学礼. 基于 ANN 的复垦土壤水分特征曲线的预测研究[J]. 农业工程学报，2008，24(10)：15 - 19.
Hu Zhenqi, Zhang Xueli. Artificial neural network for predicting water retention curves of reclaimed soils[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10): 15 - 19. (in Chinese)

11 成向荣，黄明斌，邵明安. 基于 SHAW 模型的黄土高原半干旱区农田土壤水分动态模拟[J]. 农业工程学报，2007，23(11)：1 - 7.
Cheng Xiangrong, Huang Mingbin, Shao Ming'an. Simulation of soil moisture dynamics in croplands using SHAW model in the semi-arid region of the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 1 - 7. (in Chinese)

12 程冬兵，蔡崇法. 室内基于土壤水分再分布过程推求紫色土导水参数[J]. 农业工程学报，2008，24(7)：7 - 12.
Cheng Dongbing, Cai Chongfa. Determination of purple soil unsaturated hydraulic properties based on soil water redistribution in laboratory[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 7 - 12. (in Chinese)

13 邵明安，王全九，黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京：高等教育出版社，2006：102 - 116.

14 Hwang S I, Powers S E. Estimating unique soil hydraulic parameters for sandy media from multi-step out flow experiments[J]. Advances in Water Resources, 2003, 26(4): 445 - 456.

15 龚振平，杨悦乾. 作物秸秆还田技术与机具[M]. 北京：中国农业出版社，2012：1 - 2.

16 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.

17 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.

18 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.

19 王燕,郑健,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.
Wang Yan, Zheng Jian, Ji Hong et al. Impacts of plant additive on the infiltration with sandy loam[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 63 - 67. (in Chinese)

20 王珍,冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(4):75 - 80.
Wang Zhen, Feng Hao. Effect of straw-incorporation on soil infiltration characteristics and soil water holding capacity[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(4):75 - 80. (in Chinese)

21 王增丽,王珍,冯浩. 秸秆粉碎氨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.
Wang Zengli, Wang Zhen, Feng Hao. Effects of pulverized and ammoniated straw on soil bulk density and water-holding characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 211 - 215. (in Chinese)

22 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等. 土壤水分特征曲线单一参数模型的建立及应用[J]. 农业工程学报,2008,24(12):12 - 15.
Song Xiaoyu, Li Yajuan, Li Huaiyou, et al. Establishment and application of one-parameter model of soil water characteristic curve[J]. Transactions of the CSAE,2008, 24(12): 12 - 15. (in Chinese)

23 Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties[J]. Water Resources Research, 1996, 32(9): 2697 - 2703.

24 吕殿青,邵明安,王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J]. 水利学报,2003,34(3):110 - 114.
Lü Dianqing, Shao Ming'an, Wang Quanjiu. Bulk density changing daring measuring soil water characteristics and its determining method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(3): 110 - 114. (in Chinese)

25 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.

26 王宇,吴刚. 一种基于物理化学基础分析的土水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报,2008,30(9):1282 - 1290.
Wang Yu, Wu Gang. Understanding andmodeling soil-water characteristic curves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1282 - 1290. (in Chinese)

Soil-water Characteristic Curves of Soil with Plant Additive and Analyses of the Fitting Models

Zheng Jian[1,2] Wang Yan[1] Cai Huanjie[2] Wan Jixiang[1] Li Zhijun[2]

(1. *Western China Energy & Environment Research Center , Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 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: With the aim to explore the influence of plant additive on soil water-holding capacity, the soil-water characteristic curves under different soil bulk density, different plant additives and different additive proportions were measured, and the influences of plant additive on the soil water-holding capacity under the conditions mentioned above were analyzed. Then, the soil-water characteristic curves were fitted by using the models of RETC software, and the parameters of the models and the model suitability were determined. The results show that under the same soil water suction, the soil water contents of the treatments with plant additive are higher than that of pure soil; the treatment with 3% maize leaf plant additive has better water conservation capability than the treatment with 3% maize-cob, but the treatments with 1% plant additive have little difference. In the low suction stage, the mixing plant additive reduces the proportion of large pores in the soil; while at the higher suction stage, the plant additive increases the small pores proportion of soil, thereby improves the soil water-holding capacity. The analysis results of model suitability with models of RETC software show that the optimal model of unsaturated hydraulic conductivity is fitting Mualem model. The optimal models of the treatments with 1.35 g/cm^3 and 1.40 g/cm^3 soil bulk density are VGM(m,1/n) and VGM(m,n), respectively, with 1% and 3% maize leaf additive, while those are BCM and GM(m,1/n), respectively, with 1% and 3% maize-cob additive.

Key words: Plant additive Soil-water characteristic curve Soil pore Fitting model