

玉米秸秆生物炭对贵州黄壤持水能力的影响

吴维^{1,2}, 李心清^{1,*}, 周运超³, 李云龙^{1,2}, 黄一敏^{1,2},
李阳^{1,2}, 张立科^{1,2}, 王倩^{1,2}, 程建中¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 贵州大学, 贵阳 550025)

摘要: 生物炭具有丰富的微孔结构,能够影响土壤的持水性能,对植物生长和土壤中养分的保持有着重要意义。而土壤水分特征曲线又是表征土壤持水能力的一个重要指标。本文通过压力膜法测定添加不同比例生物炭的黄壤水分特征曲线,并结合 van Genuchten 模型对实测结果进行拟合,推导水动力学参数。结果表明,随着生物炭施入量的增加(0%、5%、10%),土壤的田间持水量增加,凋萎含水量降低,土壤有效含水量增加。生物炭添加能够显著提高土壤的持水能力,增强水分的可利用性。同时, van Genuchten 模型拟合结果同实测值高度相似,可以用作预测生物炭改良土壤的水动力学参数。

关键词: 生物炭; 土壤水分特征曲线; van Genuchten 模型; 黄壤

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2017)06-0675-06 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.06.012

生物炭(Biochar)是农作物秸秆、稻壳、畜禽粪便和其他生物质废弃物在缺氧高温条件下热裂解生成的富含碳质且性质稳定的固体产物^[1-2]。由于生物炭容重小,孔隙结构丰富,比表面积大,吸附能力强,pH值高等理化性质,因此,生物炭在土壤改良、污染治理、固碳减排、环境治理等方面具有广阔的应用前景^[3-6]。

生物炭作为土壤改良剂施入土壤中,可以使土壤容重、孔隙度等性质发生变化。由于生物炭的容重远低于矿质土壤,混合一定比例的生物炭可以降低土壤容重,增加土壤孔隙度,从而提高土壤的通透性和土壤水分入渗能力^[7]。同时,土壤的持水能力取决于土壤孔隙的分布和连通性,其在很大程度上受到土壤粒径、结构特征以及土壤有机质含量的制约^[8]。因此在加入生物炭后,受其结构特征和吸湿能力的影响,土壤持水能力也会发生相应的变化。

土壤水分特征曲线是反映土壤持水能力的重要指标,是表征土壤吸力和土壤含水量关系的函数。土壤水分特征曲线还是推算其它土壤水分运动基本参数的重要基础,对于研究土壤水分运动和

溶质的运移有着重要意义^[9]。

由于土壤水分特征曲线是高度非线性的函数,同时受到土壤质地、结构、温度等多种自然环境因素的综合影响,因此,准确测定这一关系具有一定难度。目前,实验室常用的测定方法有张力计法、压力膜法、离心机法和砂芯漏斗法等^[10]。此外,人们通过大量的实验研究,提出了一些经验公式来描述土壤水分特征曲线,常见的有 Brooks-Corey 模型、van Genuchten 模型、Gardner 模型和 Campbell 模型^[11-13]。前人对此4个模型进行对比,认为 Van Genuchten 模型对各种质地的土壤均有较好的适应性^[14]。夏卫生等^[15]通过对国内外土壤水动力学参数的研究结果进行分析也得出,该模型不仅拟合效果较好,并能和土壤的机械组成和容重等联系起来,从土壤本身特性上找到其含义。因此,在所有描述土壤水分特征曲线的众多模型中, Van Genuchten 模型以其线型与实测数据曲线拟合程度好而一直得到广泛应用。

关于土壤水分特征曲线的研究,国内外学者已经开展了大量富有成效的工作,涉及到研究方

收稿日期: 2016-12-14; 改回日期: 2017-02-16

基金项目: 环境地球化学国家重点实验室开放项目(SKLEG2015904); 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB956700-2); 贵州省科技支撑计划项目-社发攻关项目(黔科合SY字^[2013]3135号)。

第一作者简介: 吴维(1989-),男,硕士研究生,环境地球化学专业,主要从事生物炭对土壤水分保持的研究。E-mail: wuwei@vip.gyig.ac.cn.

* 通讯作者: 李心清(1965-),男,研究员,从事环境地球化学研究。E-mail: lixinqing@vip.skleg.cn.

法^[16-19]、影响因素^[20-22]、模型参数拟合^[23-25]及其应用^[26-28]等。就影响因素方面的研究,如高惠嫣和杨路华^[21]测定了4种不同质地土壤的水分特征曲线并推求其水力特征参数,用以分析不同质地土壤的水分迁移和溶质运移情况;马昌臣等^[29]探讨了小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响,发现表层土壤有效含水量随着种植密度增大而递减;高会议等^[30]研究了不同施肥土壤水分特征曲线的空间变异,发现有机肥能提高土壤的持水性能。尽管土壤水分特征曲线的影响因素已有了大量的研究,但关于生物炭对土壤水分特征曲线影响的相关研究却仍然较少。因此,本文选择了在西南山区分布最广的黄壤作为研究对象,通过添加不同比例的生物炭,采用压力膜法测定了三种不同处理的土壤样品的水分特征曲线,并基于 RETC 软件使用 van Genuchten 模型对实测数据进行拟合,旨在分析生物炭对土壤水分特征曲线的影响,为生物炭改良土壤水盐运移规律的研究与数值模拟提供可靠的参数支持,以期指导生物炭在农业土壤领域的应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

生物炭: 试验所用的生物炭以开阳地区的玉米秸秆作为原材料。将秸秆粉碎后装入带盖的坩埚中,置于管式炉中以 10 °C/min 的升温速率加热至 550 °C,并在该温度下保持 30 min。整个炭化过程持续通入 200 mL/L 的氮气作为保护气氛。炭化完成后,在炉内冷却至室温取出。将生物炭研磨后过 60 目的筛,放入干燥器中备用。

土壤: 所有样品均取自贵州省贵阳市开阳县。试验田土壤类型为黄壤。取地表 0~10 cm 土层,用四分法对角取出适量土壤样品。将采集的土壤样品自然风干,挑去土中肉眼可见的杂质后过 2 mm 的筛。将上述生物炭按质量分数 0.5% 和 10% 加入土壤样品中,分别记为 C0、C5 和 C10。

土壤及生物炭中的总碳、总氮用 PE2400-II 型元素分析仪测定(美国 PE 公司)。pH 采用法国 Radiometer Analytical 公司生产的多参数测定仪 pION6 测定。土壤粒度分析是先将土壤样品用六偏磷酸溶液做分散剂,然后采用量程为 0.02~2000 μm 英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪测定。土壤容重采用环刀法测定。生物炭和土壤的基本理化性质分别见表 1 和表 2。

表 1 生物炭基本理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of the tested biochar

生物炭种类	pH	C/%	N/%	H/%	C/N
玉米秆生物炭	10.45	73.49	1.23	1.31	69.58

表 2 黄壤基本理化性质

Table 2 Physical and chemical characteristics of the tested soil

土壤类型	土壤质地	pH	总碳 / % (w/w)	总氮 / % (w/w)	粒径大小 / %			容重 (g/cm ³)
					粘粒	粉砂粒	砂粒	
黄壤	粘土	6.84	1.62	0.15	64.7	27.3	7.8	1.23

1.2 土壤水分特征曲线的测定

本次试验采用的是美国 SEC (Soilmoisture Equipment Corp) 公司的 15 巴压力膜仪来测量样品的土壤水分特征曲线(图 1)。压力膜仪由压缩气源、压力控调器和压力室三部分构成。盛放样品的陶瓷板在使用前需用水浸润,使陶瓷板孔隙中形成具有一定张力的凹月面水膜,其作用是阻止空气和土壤通过,而只让水通过。将 3 种不同生物炭处理的土壤样品填入环刀中,样品高度保持与环刀持平。将填满样品的环刀放在多孔陶瓷板上,连同陶瓷板放入去离子水中浸泡 24 h,使土样达到饱和。之后将样品放入密封的压力室内,打开气源并调节到目标压力,进行脱水实验。随着压力上升,土壤水势相应增加,当土壤水势大于陶瓷板的渗透势时,水分就从土样中流出,并通过排水管流入滴定管中。观察滴定管液面高度,当 24 h 内液面高度变化小于 0.3 mL 时,判定脱水过程达到平衡。本次试验的压力值由低到高分别设定为 2.5、5、10、33、100、300 和 1500 kPa。每次样品达到平衡后,迅速取出称重,再将样品放入压力膜仪内,调节压力,进行下一轮试验。重复上述过程,直到完成所有压力下的脱水试验。最后,将样品置于烘箱中,在 105 °C 条件下烘干 24 h 后称重。以上每个样品均设置 3 个重复。样品的含水量按公式(1)计算。

$$\theta_v = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times \rho_b \quad (1)$$

式中 θ_v 为土壤容积含水量 (cm³/cm³), m_w 为土壤湿重 (g), m_d 为土壤干重 (g), ρ_b 为土壤容重 (g/cm³)。

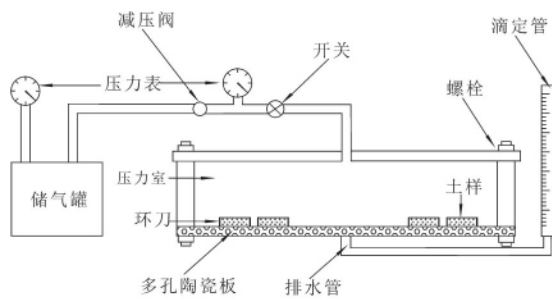


图1 土壤水分特征曲线测定装置

Fig.1 Measurement device for soil water content curve

1.3 数据的拟合

本文基于 RETC 软件使用 van Genuchten (VG) 模型对试验实测数据进行拟合。

VG 模型是由美国学者 Van Genuchten 于 1980 年提出,该公式能很好地描述土壤脱水过程的土壤水分特征曲线,其表达式为:

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

式中, θ 为体积含水量 (cm^3/cm^3), θ_r 为残余含水量 (cm^3/cm^3), θ_s 为饱和含水量 (cm^3/cm^3), h 为土壤水吸力 (cm), 其在数值上等于脱水试验中设定的压力值, α 是与进气吸力相关的参数, n, m 为表示水分特征曲线形状的经验参数。通过测定一系列压力值下所对应的样品的体积含水量, 便可通过计算拟合出公式中的 $\theta_s, \theta_r, \alpha, n$ 4 个参数, 将这些参数代入公式 (2) 中, 便可得到土壤含水量与土壤吸力的一个函数关系式。

RETC 是由美国盐改中心开发的软件, 可用于分析非饱和土壤水分和水力传导特性。它可以很方便的实现土壤转换函数功能。打开软件后, 首先选择土壤水分特征曲线模拟功能。然后选择模拟数据所需要用到的模型, 用户可以自定义模型中各参数的单位。之后, 选择土壤质地等级或者输入沙粒、粉粒、粘粒的百分含量以及容重等条件, 来估算模型中各参数的初始值。最后, 输入实测的土壤含水量和土壤吸力数据, 并运行软件, 便可以拟合出 VG 模型中的相关参数, 推求出经验公式。相较于 Matlab 等其他的数据拟合软件, RETC 操作步奏简单, 计算精度高, 无需编程。

对比实测值和 VG 模型的计算结果, 拟合优度采用相关系数 (r)、均方根误差 (RMSE) 和纳什系数 (NSE) 进行评价。相关系数是判断模型模拟结果与实测数据相关性的一个指标, 取值范围为 $-1 < r < 1$ 。

r 绝对值约接近于 1 表明变量之间存在显著的相关性, 模拟结果可信度高; 当 r 接近于 0, 则表明变量之间不存在相关关系, 模拟结果未达到要求。通常认为 r 绝对值达到 0.8 以上为高度相关, 在 0.3 以下则为无直线相关。均方根误差是观测值与真值偏差的平方与观测次数 n 比值的平方根, 用来衡量观测同实测含水量的偏差, 其值越小, 表明模拟结果越可靠。纳什系数是评价模式质量的一个评价参数, 其取值范围为 $-\infty$ 到 1, 若接近 1, 表示模式质量好, 模型可信度高; 若接近 0, 表示模拟结果接近观测值的平均值水平, 即总体结果可信, 但过程模拟误差大; 若远远小于 0, 则表示模型是不可信的。各指示参数的公式如 (3) ~ (5) [31-33]。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

式中 r 为相关系数, $RMSE$ 为均方根误差, NSE 为纳什系数, n 为设定压力值的总个数, O_i 表示第 i 个压力下对应含水量的实测值, S_i 表示对应含水量的模拟值, \bar{O} 和 \bar{S} 分别表示实测含水量和模拟含水量的平均值。

2 结果与分析

2.1 实测数据分析

添加不同比例生物炭后实测的土壤水分特征曲线见图 2。从图中可以看到, 三组不同生物炭量处理的样品, 其土壤水分特征曲线变化趋势一致。在低吸力范围内 (0~100 kPa) 含水量随吸力增加急剧降低, 此阶段水分的保持主要取决于毛细作用和孔隙大小, 受结构影响大; 土壤容易释放水分, 植物吸收水分需要能量较小。当土壤水吸力较大时 (100~1500 kPa), 随着吸力的增加, 土壤含水量降低速率变缓。这一阶段, 吸附作用的影响越来越大, 土壤质地的影响占主导地位。土壤释放水分难, 植物吸收相同的水分需要更多的能量。在同一吸力值下, 不同样品含水量之间存在差异。在土壤

水吸力小于 100 kPa 时,样品生物炭含量越高,同一吸力下,其含水量也越高。随着吸力逐渐增大,当压力值大于 100 kPa 后,样品的含水量与生物炭加入量呈负相关,即生物炭加入量越大,样品在相同吸力下的含水量越低。

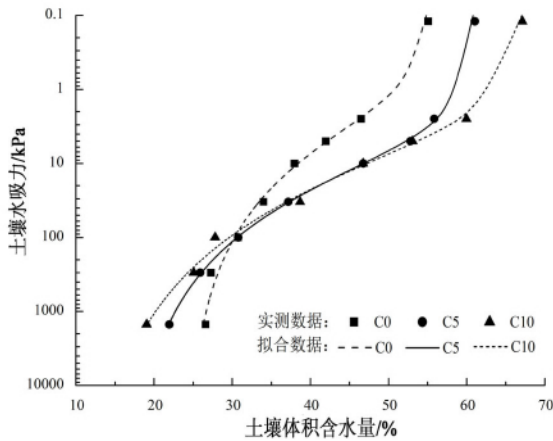


图2 不同生物炭加入量三组样品的土壤水分特征曲线
Fig.2 Water retention curve for tested soil with different amount of biochar addition

不同处理土壤水分物理性质见表3。添加生物炭降低了土壤容重,提高了土壤孔隙度。根据前人对土壤水分特征曲线的研究,通常认为 1500 kPa 吸力值对应的含水量为土壤的凋萎含水量,33 kPa 对应的含水量为土壤的田间持水量,介于田间持水量和凋萎含水量之间的含水量为土壤的有效含水量,即能被植物吸收利用的水量^[34]。从表4中可以看到,土壤的凋萎含水量随着生物炭加入比例增加而减少,C10的凋萎含水量最低,为19.05%,较C5和C0分别降低了2.91%和7.55%。土壤田间持水量随着生物炭加入量增加而增加,C10的田间持水量最高,为38.68%,较C5增加了1.49%,较C0增加了4.68%。土壤的有效含水量与生物炭添加量呈显著正相关。生物炭施入量越大,土壤的有效性也就越高,植物更容易从土壤中吸收水分。这是因为,生物炭的加入使土壤总孔隙度增加的同时,相应的增加了土壤的毛管孔隙度。随着土壤水吸力的增加,土壤被压实,当吸力到达33 kPa时,土壤大孔中的水分最先排出,毛管孔隙中的水则仍保留在土壤中,因此,生物炭含量越高,此时的含水量也越高,田间持水量越大。随着土壤水吸力的进一步增加,保持在土壤毛管孔隙中的水被排出,因此,生物炭加入量越大,毛管孔隙度越高,在1500 kPa时土

表3 不同生物炭处理量样品的土壤水分物理性质

Table 3 Soli hydro-physical properties of different biochar addition

样品编号	总孔隙度 /%	容重 / (g/cm ³)	田间持水量 /%	凋萎含水量 /%	有效含水量 /%
C0	52.46	1.23	34.00	26.60	7.40
C5	59.44	1.04	37.19	21.96	15.23
C10	66.92	0.86	38.68	19.05	19.63

壤排出的水也就越多,保持在土壤中的水分也就越少,凋萎含水量也就越小。

基于土壤改良来提高其持水能力,国内外学者已展开了类似的研究。如 Barzegar (2002)^[22] 曾通过添加农家堆肥、小麦秸秆和甘蔗渣来研究其对土壤持水能力的影响,结果显示,3种物质均能提高土壤的有机质含量,降低土壤容重,提高土壤的持水能力;改良剂添加比例越高,土壤容重越低,有效含水量越高。其中,添加10%甘蔗渣的改良效果最好,土壤容重降低了0.04 g/cm³,土壤总孔隙度提高了1.5%,土壤的田间持水量从30%提高到了33%,而土壤的凋萎含水量则几乎不受影响,均为12%左右。因此,添加10%的甘蔗渣仅提高了3%的有效含水量。本研究添加10%的玉米秸秆生物炭,土壤的总孔隙度提高了14.46%,有效含水量提高了12.23%,改良效果明显优于甘蔗渣,农家堆肥和作物秸秆。这是因为生物质在热解过程中,生物质中不稳定、易挥发的结构逐渐消失,并形成了大量的微小孔隙结构。生物质炭化后其比表面积大幅提升,玉米秸秆炭化后比表面积平均提高了3.7倍;总孔体积平均提高了4倍,微孔体积平均提高了3倍^[35]。因而相对于直接使用禽畜粪便和作物秸秆,使用炭化后的生物炭作为土壤改良剂,能更加有效的增加土壤孔隙度,提高土壤的有效含水量。

2.2 模型拟合结果

将实测的土壤水分含量和土壤水势的数据输入 RETC 软件中,应用最小二乘法拟合出 Van Genuchten 模型中的 θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 4 个参数(见表4)。将参数带入 VG 模型公式(1)中,便可以得到图2中三种不同生物炭处理样品的土壤水分特征曲线。实测值和模拟值对比结果见表5。

拟合结果显示,土壤的饱和含水量与生物炭添加量呈正相关,残余含水量与生物炭添加量呈负相关。由于饱和含水量反映的是土壤所有孔隙填满水时的含水量,添加生物炭提高了土壤孔隙度因而

表4 Van Genuchten 模型参数拟合值

Table 4 Simulated parameters of Van Genuchten model

样品编号	残余含水量 θ_r /(cm^3/cm^3)	饱和含水量 θ_s /(cm^3/cm^3)	参数 α	参数 n
C0	0.238 7	0.551 0	0.078 7	1.362 2
C5	0.165 8	0.608 8	0.023 6	1.361 8
C10	0.108 0	0.672 3	0.037 3	1.302 7

表5 不同吸力下土壤含水量实测值和模拟值

Table 5 Observed and simulated soil water content under different soil water suction

土壤水 吸力 /kPa	土壤体积含水量/%					
	C0		C5		C10	
	实测值	拟合值	实测值	拟合值	实测值	拟合值
0	55.07	55.10	61.06	60.88	67.12	67.23
2.5	46.49	46.23	55.85	56.44	59.97	59.33
5	41.99	42.17	52.81	52.28	53.07	53.70
10	37.97	38.44	46.76	46.80	46.74	47.25
33	34.00	33.44	37.19	37.33	38.68	36.96
100	30.74	30.29	30.78	30.64	27.82	29.62
300	27.27	28.19	25.90	26.06	25.07	24.32
1500	26.60	26.28	21.96	21.88	19.05	19.11

也使饱和含水量相应提高。而残余含水量反应的是土壤导水率或扩散率为零时的含水量,由于添加生物炭提高了土壤水分的流动性和有效性,因此土壤的残余含水量随着生物炭的增加而相应的降低。模型拟合结果与实际情况相吻合。实测数据从图2和表5中可以看到, VG模型对贵州黄壤的水分特

征曲线拟合程度比较高,实测点基本都落到拟合的曲线上。从表6的统计数据可以看到,每组样品的相关系数 r 均大于 0.99,均方根误差 RMSE 均小于 0.01,纳什系数 NSE 均大于 0.99,模拟结果与实测数据呈高度线性相关,因此, VG模型可以预测生物炭改良土壤中的水动力学参数。

表6 RETC 模型拟合统计特征值

Table 6 Fitting statistic characteristic values of RETC

样品编号	相关系数	均方根误差	纳什系数
C0	0.998 7	0.004 7	0.997 4
C5	0.999 8	0.003 0	0.999 5
C10	0.997 9	0.010 8	0.995 6

3 结 论

1) 在土壤低吸力段(<100 kPa),土壤的含水量与生物炭添加量呈正相关;在高吸力段(>100 kPa),土壤含水量与生物炭添加量呈负相关。土壤田间持水量随生物炭添加量增加而提高,凋萎含水量随生物炭添加量增加而降低。生物炭的添加提高了土壤水分的有效性,使土壤中的水分更容易被植物利用。

2) 用 van Genuchten 模型拟合贵州黄壤水分特征曲线,拟合的土壤水力参数与实际情况相吻合。根据相关系数、均方根误差及纳什系数评价结果可知,拟合结果与实测值误差小,模型可信度高,为该模型模拟生物炭改良土壤的水分特征曲线提供了科学的参考。

参 考 文 献

- [1] Antal M J, Gronli M. The art, science, and technology of charcoal production [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42(8): 1619-1940.
- [2] 房彬,李心清,赵斌,等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(8): 1292-1297.
- [3] Xu G, Lv Y, Sun J, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2012, 40(10): 1093-1098.
- [4] 何绪生,耿增超,余雕,等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- [5] 王萌萌,周启星. 生物炭的土壤环境效应及其机制研究 [J]. 环境化学, 2013, 32(5): 768-780.
- [6] 孟军,陈温福. 中国生物炭研究及其产业发展趋势 [J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版), 2013, 15(1): 1-5.
- [7] Zhang A, Bian R, Pan G, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles [J]. Field Crops Research, 2012, 127(127): 153-160.
- [8] 武玉,徐刚,吕迎春,等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79.
- [9] 李开元,李玉山. 土壤水分特征曲线的意义及其应用 [J]. 陕西农业科学, 1991(4): 47-48.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Too V K, Omuto C T, Blamah E K, et al. Review of soil water retention characteristic (SWRC) models between saturation and oven dryness [J].

- Open Journal of Modern Hydrology ,2014 ,4(4) : 173.
- [13] Babaian E ,Homaee M , Vereecken H , *et al.* A comparative study of multiple approaches for predicting the soil-water retention curve: Hyper-spectral information vs. basic soil properties[J]. Soil Science Society of America Journal ,2015 ,79(4) : 1043-1058.
- [14] 徐绍辉,刘建立. 土壤水力性质确定方法研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(4) : 394-401.
- [15] 夏卫生,雷廷武,潘英华,等. 土壤水分动力学参数研究与评价[J]. 灌溉排水学报,2002 21(1) : 72-5.
- [16] 韩祥伟,邵明安,王全九. 简单入渗法在确定 Brooks-Corey 水分特征曲线模型参数中的应用研究[J]. 土壤学报,2006,43(3) : 506-508.
- [17] 赵宝平,李晓云,郭建平,等. 基于体积压力板仪及压力膜仪法的土水特征曲线研究[J]. 科技信息,2010,2(17) : 34-35.
- [18] Huang G H ,Zhang R D ,Huang Q Z. Modeling soil water retention curve with a fractal method [J]. Pedosphere ,2006 ,16(2) : 137-146.
- [19] 刘建立,徐绍辉,刘慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J]. 水利学报,2004,35(2) : 68-76.
- [20] 高红贝. 温度对土壤水分运动及参数的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,2011.
- [21] 高惠嫣,杨路华. 不同质地土壤的水分特征曲线参数分析[J]. 河北农业大学学报,2012,(05) : 129-132.
- [22] Barzegar A R ,Yousefi A ,Daryashenas A. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat [J]. Plant and Soil ,2002 ,247(2) : 295-301.
- [23] 李峰,缴锡云,李盼盼,等. 田间土壤水分特征曲线参数反演[J]. 河海大学学报,2009,37(04) : 373-377.
- [24] 蔡飞,邵孝侯,王振宇,等. 天津滨海绿地土壤水分特征曲线的拟合与比较分析[J]. 地球信息科学学报,2010,12(3) : 336-341.
- [25] 高雄飞,刘元会,郭建青,等. 土壤水分特征曲线模型参数识别的多邻域粒子群算法[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(6) : 48-52.
- [26] 李娇,牛健植. 北京西山侧柏林和刺槐林土壤水分研究[J]. 水土保持研究,2013,20(1) : 98-101.
- [27] 吴煜禾,张洪江,王伟,等. 重庆四面山不同土地利用方式土壤水分特征曲线测定与评价[J]. 西南大学学报(自然科学版) ,2011,35(5) : 102-108.
- [28] 王丽琴,李红丽,董智,等. 黄河三角洲盐碱地造林对土壤水分特性的影响[J]. 中国水土保持科学,2014,12(1) : 38-45.
- [29] 马昌臣,王飞,穆兴民,等. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2) : 105-109.
- [30] 高会议,郭胜利,刘文兆,等. 不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J]. 农业机械学报,2014,45(6) : 161-165.
- [31] 朱海清,虎胆·吐马尔白,热合木,等. 干旱区盐碱土壤水分特征曲线模拟研究[J]. 新疆农业大学学报,2015,(02) : 168-72.
- [32] Rawls W , Pachepsky Y A , Ritchie J , *et al.* Effect of soil organic carbon on soil water retention[J]. Geoderma ,2003 ,116(1) : 61-76.
- [33] Seki K. SWRC fit-a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions ,2007 ,4(1) : 407-437.
- [34] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报,2010,47(4) : 611-620.
- [35] 张伟明. 生物炭的理化性质及其在作物生产上的应用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学,2012.

Impact of Corn Straw Biochar on Water Holding Capacity of the Yellow Soil in Guizhou Province , China

WU Wei^{1 2} , LEE Xinqing¹ , Zhou Yunchao³ , LI Yunlong^{1 2} , HUANG Yimin^{1 2} ,
LI Yang^{1 2} , ZHANG Like^{1 2} , WANG Qian^{1 2} , CHENG Jianzhong¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry , Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 3. Guizhou University , Guiyang 550025 , China)

Abstract: Owing to its porous structure , biochar amendment in the soil is expected to increase soil water holding capacity and is important for plant growth and nutrition reservation. Soil water retention curve depicts soil water holding capacity. Here we studied the effect of biochar on water retention curve of the yellow soil from Guizhou Province at the application rates 0 , 5% and 10% , corresponding to non-biochar , 50t/ha and 100t/ha of biochar , respectively , by using pressure membrane analyzer. And van Genuchten model was used to simulate the observed data to deduce hydrodynamic parameters. We found that biochar amendment increased the field capacity and effective water content but reduced the permanent wilting point , as results , improving the water holding capacity and water availability of the soil. The change of water retention curve abides by the van Genuchten model at the various application rate of Biochar , indicating that the retention curve can be predicted by the model.

Key words: biochar; water retention curve; van Genuchten model , yellow soil