DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.06.014

生物质炭对旱地红壤理化性状和水力学特性的影响

靳泽文[1,2]，陈效民[1,2]，李秋霞[1]，靖 彦[1]，张佳宝[2]，黄欠如[3]

(1. 南京农业大学 资源与环境科学学院，江苏 南京 210095；2. 中国科学院 南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室，江苏 南京 210008；3. 江西红壤研究所，江西 进贤 331717)

摘 要：[目的] 研究生物质炭对旱地红壤基本理化性质及水分特征曲线的影响，为红壤地区土壤改良提供依据。[方法] 分层测定不同生物质炭施用量水平下的土样容重、孔隙度和有机碳含量，采用原状土压力膜法分层测定土壤的水分特征曲线。[结果] 施用生物质炭能显著降低土壤的容重，提高土壤的孔隙度及有机碳含量，且随着施用量的增加，土壤容重逐渐降低，孔隙度及有机碳含量逐渐提高；随着生物质炭施用量的增加，土壤饱和含水量、田间持水量和有效水含量逐渐增加，凋萎系数逐渐减小，施用生物质炭 30 t/hm^2 的土壤处理饱和含水量、田间持水量和有效水含量最高；生物质炭施用量与土壤饱和含水量、田间持水量和有效水含量呈极显著正相关关系，与凋萎系数呈极显著负相关关系。[结论] 施用生物质炭能显著提高红壤田间持水量和有效水含量。

关键词：生物质炭；旱地红壤；理化性状；水分特征曲线

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2015)06-0081-05 **中图分类号**：S152.5，S152.7^{+4}

Effects of Biochar on Physicochemical Properties and Hydraulic Characteristics in Upland Red Soil

JIN Zewen[1,2], CHEN Xiaomin[1,2], LI Qiuxia[1], JING Yan[1], ZHANG Jiabao[2], HUANG Qianru[3]

(1. *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu* 210095, *China*; 2. *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu* 210008, *China*; 3. *Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi*, 331717, *China*)

Abstract: [Objective] The impacts of biochar on the physicochemical properties and hydraulic characteristics were assessed in order to guide the improving of the red soil at uplands. [Methods] Soil bulk density and porosity were measured for samples of two different layers of undisturbed red soil treated with varying amount of biochar, and curve of soil water characteristics were studied by pressure membrane method. [Results] Application of biochar could significantly decrease bulk density as well as improve porosity and soil organic carbon content. With the increase of application amount, soil bulk density decreased; While porosity and soil carbon content increased gradually. Soil saturation moisture content, field capacity and available water content increased and wilting coefficient decreased with the increasing application of biochar. The saturated moisture content, field capacity and available water content were at their highest when the application biochar was 30 t/hm^2. The application amount of biochar was significantly and positively correlated with soil saturation moisture content, field capacity and available water content, and had significant negative correlation with wilting coefficient. [Conclusion] Application of biochar can significantly increase field capacity and available water content of red soil.

Keywords: biochar; upland red soil; physicochemical characters; soil water characteristic curve

红壤是中国热带和亚热带地区的地带性土壤，广泛分布于长江以南各省区，是中国重要的土壤资源，在占全国耕地面积 28%的红壤地区支撑了占全国 43%的人口[1]。但是由第四纪红色黏土发育而来的

收稿日期：2014-09-21 **修回日期**：2014-11-26

资助项目：国家基础科学发展(973)计划项目“典型地区农田地力定向培育理论与技术对策”子课题“典型红壤区农田地力定向培育与提升技术研究”(2011CB100506)；土壤与农业可持续发展国家重点实验室基金项目(0812201208)

第一作者：靳泽文(1990—)，男(汉族)，山西省太原市人，硕士研究生，研究方向为水土资源利用与管理研究。E-mail：2013103071@njau.edu.cn。

通信作者：陈效民(1957—)，男(汉族)，江苏省张家港市人，博士，教授，主要从事水土资源利用与环境和土壤与环境物理过程研究。E-mail：xmchen@njau.edu.cn。

江西旱地红壤，土壤容重较高，孔隙度较低，有机碳含量低，质地黏重，硬度较大，加之黏粒表面吸附的水分和团聚体内所吸持的无效水分占土壤含水量的比重较大，导致其有效水含量较低，保水、保肥性较差[2]。土壤水分特征曲线是反映土壤水势与土壤含水量之间关系的基本土壤水力参数，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[3-4]，可间接地反映土壤孔隙的分布[5]。通过土壤水分特征曲线能了解土壤的持水性、土壤水分的有效性，可应用数学物理方法对土壤水分运动进行定量分析[6]。近年来，利用生物质炭改良土壤已成为科学研究的热点。生物质炭(biochar, BC)是作物秸秆等有机物质在限制供氧的条件下加热而成[7]，其具有偏碱性和疏松多孔的性质。有研究[8]表明生物质炭不但能补充土壤的有机物含量同时还能有效地保存水分和养料，提高土壤肥力。本研究选择不同生物质炭施用量下的旱地红壤，分别研究其基本理化性质和水分特征曲线，探讨施用生物质炭与土壤水分特征参数的相关关系，为进一步研究生物质炭对旱地红壤基本理化性质的影响及水分保持与运移、土壤水分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在江西省进贤县红壤研究所的旱地红壤上进行，其地理位置为116°20′24″N，28°15′30″E，属于亚热带湿润气候，气候温和，雨量充沛，日照充足，无霜期长。年平均气温17.5 ℃，年平均无霜期282 d，年平均日照时数19 00～2 000 h，年降雨量1 587 mm，降雨主要集中在3—6月。供试土壤基本性质为：土壤pH值4.54，全氮0.98 g/kg，阳离子交换量15.20 cmol/kg，有效磷13.26 mg/kg，有机碳7.98 g/kg，全磷0.45 g/kg，总孔隙度53.60%，容重1.23 g/cm^3，结构系数94.16%，，黏粒316.00 g/kg，粉砂粒391.20 g/kg，砂粒292.80 g/kg。

1.2 试验设计

生物质炭于2011年9月施入，C因素(生物质炭)施用量分7个水平，分别为：C_0 0 t/hm^2，C_1 2.5 t/hm^2，C_2 5 t/hm^2，C_3 10 t/hm^2，C_4 20 t/hm^2，C_5 30 t/hm^2，C_6 40 t/hm^2；氮磷钾肥按照当地农民施用量施入土壤。各小区随机区组排列，每个小区的面积为5 m×4 m=20 m^2，每个处理3次重复。本试验施用的生物质炭来自于河南商丘三利新能源有限公司，原料为小麦秸秆，炭化温度为350～500 ℃，生物质材料35%转化为生物质炭，生物质炭的pH值为10.35，阳离子交换量为217 cmol/kg，有效磷4.7 g/kg，有机碳467.1 g/kg，全氮5.9 g/kg，容重0.45 g/cm^3，比表面积8.9 m^2/g。试验地一年两季，为油菜和红薯轮作，供试油菜为德油5号，红薯为署薯8号。

1.3 土壤指标测定

1.3.1 土壤容重、孔隙度和有机碳含量 测定于2014年4月27日，按0—15 cm，15—30 cm分层采集土壤剖面样品。土壤容重采用环刀法测定；土壤总孔隙度采用〔(1－容重)/比重×100〕计算；土壤有机碳的测定采用重铬酸钾容量法，测定结果详见表1。

1.3.2 土壤水分特征曲线测定 采用压力膜仪进行测定，按土壤层次用容重圈分别采集C_0，C_1，C_2，C_3，C_4，C_5和C_6处理各小区0—15及15—30 cm土层的样品，每层采集3个土样，共42个土样。试验前将纱布垫于容重环下，用橡皮筋固定，饱和24 h，称得环刀加纱布及饱和土重，处理完成后置于压力膜装置上测定，在0，1×10^4，3×10^4，5×10^4，1×10^5，3×10^5，5×10^5和1.5×10^6 Pa共8个不同吸力下测定土壤含水量，经1.5×10^6 Pa压力脱水后的土样置于105 ℃烘箱内烘干，冷却称重，最后得出在饱和至烘干后及各吸力下的土壤含水量，用各处理含水量及所施加的对应吸力记录土壤水分特征曲线参数[9]。

1.4 数据处理

采用Excel软件对数据进行处理，采用SPSS软件进行方差分析和相关性分析($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同生物质炭施用量下土壤容重、孔隙度、有机碳含量变化

表1为各处理容重、孔隙度和有机碳含量的测定结果。从表1可以看出，随着生物质炭施用量的增加，土壤容重逐渐降低，孔隙度逐渐增加，这是因为生物质炭疏松多孔，比重较小，加入土壤后显著改变了土壤容重，增加了土壤的孔隙度，其中各处理0—15 cm土层土壤容重降幅较15—30 cm土层大。各处理0—15 cm土层土壤孔隙度增幅较15—30 cm土层高。施用生物质炭各处理0—15 cm土层的土壤容重较对照分别降低了2.46%，4.10%，7.38%，10.66%，13.11%和13.93%，C_5和C_6处理与其他处理相比差异显著；孔隙度分别提高了2.82%，3.15%，5.71%，9.09%，10.69%和10.78%，C_5，C_6处理与其他处理相比差异也较为显著。15—30 cm土层的土壤容重分别降低了1.41%，1.41%，6.34%，6.34%，9.86%和9.86%，孔隙度分别提高了0.26%，0.38%，6.92%，7.24%，10.97%和10.99%，C_5和C_6处理在容重与孔隙度2个指标上

与其他处理之间也表现为显著性差异。

生物质炭可以提高土壤有机碳的含量[10]。土壤有机碳含量增加可提高土壤的 C/N 比,从而提高土壤对氮素及其他养分元素吸持容量[11]。本研究中,随着生物质炭施用量的增加,土壤有机碳的含量逐渐提高,由于旱地红壤有机碳含量较低[12],因此施加生物质炭后有机碳提高幅度明显,0—15 cm 土层不同处理有机碳含量分别增加了 32.71%,33.18%,48.89%,82.42%,100.69%和 158.44%,除 C_1 与 C_2 处理间差异不显著外,其他各处理间差异均达到显著水平;15—30 cm土层不同处理的有机碳含量分别增加了 5.66%,5.83%,21.61%,45.80%,60.89%和 150.94%,除 C_1 与 C_2 处理外,其他各处理间差异也达到了显著性水平。

2.2　不同生物质炭施用量下土壤水分特征曲线状况

水分特征曲线表示土壤水的能量状态与土壤水含量之间的关系,反映了土壤基本的持水特性。表 2 为根据压力膜法测定的水分特征曲线数据,其中饱和含水量、田间持水量和有效水含量等指导农业灌溉的必要参数详见表 3。

表 1　土壤容重、孔隙度、有机碳含量测定结果

土层/cm	处理	容重/(g·cm^{-3})	孔隙度/%	有机碳含量/(g·kg^{-1})
0—15	C_0	1.22^{a}	54.25^{a}	8.59^{a}
	C_1	1.19^{b}	55.78^{b}	11.40^{b}
	C_2	1.17^{bc}	55.96^{bc}	11.44^{b}
	C_3	1.13^{c}	57.35^{c}	12.79^{c}
	C_4	1.09^{d}	59.18^{d}	15.67^{d}
	C_5	1.06^{e}	60.05^{e}	17.24^{e}
	C_6	1.05^{e}	60.10^{e}	22.20^{f}
15—30	C_0	1.42^{a}	46.94^{a}	5.83^{a}
	C_1	1.40^{a}	47.06^{ab}	6.16^{b}
	C_2	1.40^{a}	47.12^{b}	6.17^{b}
	C_3	1.33^{b}	50.19^{c}	7.09^{c}
	C_4	1.32^{bc}	51.34^{cd}	8.50^{d}
	C_5	1.28^{c}	52.09^{d}	9.38^{e}
	C_6	1.26^{c}	52.10^{d}	14.63^{f}

注:同列中各数值后小写字母不同表示处理间有显著差异($p<0.05$)。下同。

饱和含水量是指土壤孔隙全部充满水时的最大含水量,其包括吸湿水、膜状水、毛管水和重力水。从表 3 可以看出,在同一土层中土壤的饱和含水量随着生物质炭施用量的增加而增加,0—15 cm 土层各处理相比空白分别提高了 2.34%,3.05%,13.02%,14.25%,16.78%和 16.57%,在 C_5 水平时饱和含水量达到最大,相比空白提高了 16.78%,这是由于生物质炭是一种多孔材料,可以增加土壤的吸水性,且生物质炭的表面结构使其具有比表面积大、容重小的特征,与土壤混合改变了土壤原有的孔隙状况,使其容重降低,提高的土壤孔隙度,增加了土壤对水分的吸持量,且生物质炭施用量越大,对土壤孔隙度的影响也就越大,土壤的持水性能改变也越大[13];除外,生物质炭表面极性官能团较多,亲水性较强,具有较大的水分截留能力,且生物质炭的孔隙结构能够减小水分的渗滤速度[14],而 C_6 的饱和含水量有所降低,这可能是由于生物质炭表面普遍具有斥水性,当其施用量增加时,这种斥水效应就更容易表现出来[15],加之生物质炭含量过高会堵塞了部分孔隙[16],因此,施用量更高的 C_6 处理饱和含水量较 C_5 处理有所降低。同一处理中 0—15 cm 土层土壤的饱和含水量较 15—30 cm 土层高,这是因为 0—15 cm 土层受耕作及施用有机肥的影响容重较低,孔隙度及有机碳含量也较高,导致 0—15 cm 土层饱和含水量较 15—30 cm 土层高。

田间持水量是指压力为 3.0×10^4 Pa 时测得的土壤含水量,是植物有效水的上限,可表示土壤持水能力的高低。C_0 处理 0—15 cm 土层的田间持水量最小,随着生物质炭施用量的增加,田间持水量呈现出一种逐渐增大的趋势,各处理相较空白分别提高了 3.44%,4.18%,12.42%,12.77%,28.29%和 22.80%,以 C_5 处理的增幅最大,且 C_5 和 C_6 处理的田间持水量显著高于其他处理。这是因为红壤具有膨胀性强的特点,添加的生物质炭表面积大,颗粒较细,毛管孔隙丰富,遇水后孔隙内表面产生的张力较大,对水的吸持较强。其次,有机物在裂解为生物质炭时,由于内部气态或液态物质的生成释放以及后期温度升高,生物质炭自身内部发生熔陷,会形成孔径大小不一的微小孔隙[17],正是这些孔隙的存在,才使生物质炭具有良好的保水性能,生物质炭施用到土壤中后提高了土壤的有效水含量,且随着生物质炭施用量的增加,土壤的田间持水量也有所增加。15—30 cm 土层呈现出与 0—15 cm 土层田间持水量随生物质炭施用量升高而增大的相同的趋势,但两土层间田间持水量差异不明显。凋萎系数是指植物产生永久凋萎时的土壤含水量,在实际操作中一般取 1.5×10^6 Pa 时的土壤含水量作为凋萎系数。由表 3 可以看出,未施生物质炭的 C_0 处理土壤凋萎系数最高,随着生物质炭施用量的增加,0—15 cm 及 15—30 cm 的土壤凋萎系数呈现出逐渐降低的趋势,各处理与空白相比差异显著,C_5 和 C_6 处理土壤凋萎系数最低,较空白分别降低了 15.59%和 19.63%。这是由于土壤的凋萎系数

与土壤容重呈显著正相关关系，而生物质炭本身密度较小，孔隙丰富，因此施入土壤后会使土壤容重降低，从而降低土壤的凋萎系数。

土壤最大有效水含量是指田间持水量减去凋萎系数所得的差值，从表 3 可以看出，随着生物质炭施用量的增加，土壤的有效水含量逐渐增加，0—15 cm 土层各处理相比空白分别提高了 11.88%，16.27%，42.08%，51.61%，92.18%和 84.58%，其中 C_5 处理有效水含量最高。这一方面是因为生物质炭的施入提高了田间持水量并且降低有效水含量而使土壤最大有效水含量增加；另一方面生物质炭的添加提高了土壤有机碳的含量，而有机碳则因含有大量的亲水胶体而使土壤对于有效水的吸持能力增加[18]。15—30 cm 土层的有效水含量与 0—15 cm 土层呈现出相同的随生物质炭施用量增加而提高的趋势，C_5 处理有效水含量最高，各处理有效水含量均高于空白处理且与空白之间差异显著，0—15 cm 土层各处理较 15—30 cm 土层对应处理的有效水含量要高。

表 2 各处理不同吸力下含水量 cm^3/cm^3

土层/cm	处理	吸力/10^5 Pa							
		0	0.1	0.3	0.5	1	3	5	15
0—15	C_0	0.465 3	0.329 4	0.229 4	0.187 1	0.160 2	0.138 1	0.130 4	0.136 0
	C_1	0.476 2	0.337 3	0.237 3	0.198 0	0.162 5	0.129 6	0.128 7	0.132 8
	C_2	0.479 5	0.339 0	0.239 0	0.206 4	0.174 5	0.122 3	0.121 0	0.130 4
	C_3	0.525 9	0.357 9	0.257 9	0.211 4	0.176 1	0.122 1	0.120 1	0.125 2
	C_4	0.531 6	0.358 7	0.258 7	0.214 2	0.174 5	0.121 6	0.118 6	0.117 1
	C_5	0.543 4	0.380 4	0.294 3	0.234 8	0.184 1	0.118 3	0.118 3	0.114 8
	C_6	0.542 4	0.394 1	0.281 7	0.246 2	0.182 7	0.125 8	0.114 9	0.109 3
15—30	C_0	0.385 2	0.319 8	0.220 7	0.190 6	0.189 4	0.149 2	0.148 8	0.147 6
	C_1	0.391 3	0.337 8	0.231 8	0.201 1	0.188 4	0.149 1	0.146 3	0.144 4
	C_2	0.401 2	0.341 6	0.234 3	0.219 6	0.191 9	0.145 1	0.142 8	0.142 1
	C_3	0.431 7	0.346 6	0.258 7	0.223 4	0.194 2	0.139 2	0.131 6	0.130 8
	C_4	0.485 8	0.354 7	0.250 3	0.220 1	0.196 6	0.130 6	0.130 3	0.127 4
	C_5	0.496 6	0.364 1	0.293 7	0.248 9	0.190 5	0.139 6	0.128 4	0.124 8
	C_6	0.492 1	0.383 2	0.283 0	0.275 8	0.206 4	0.135 4	0.124 5	0.117 8

表 3 各处理水分特征曲线参数

土层/cm	处理	饱和含水量/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	田间持水量/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	凋萎系数/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	有效水含量/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	进气值倒数 a
0—15	C_0	$0.465\ 3^{a}$	$0.229\ 4^{a}$	$0.136\ 0^{a}$	$0.093\ 4^{a}$	$0.020\ 2^{a}$
	C_1	$0.476\ 2^{b}$	$0.237\ 3^{b}$	$0.132\ 8^{b}$	$0.104\ 5^{b}$	$0.021\ 0^{b}$
	C_2	$0.479\ 5^{b}$	$0.239\ 0^{b}$	$0.130\ 4^{b}$	$0.108\ 6^{b}$	$0.021\ 9^{b}$
	C_3	$0.525\ 9^{c}$	$0.257\ 9^{c}$	$0.125\ 2^{c}$	$0.132\ 7^{c}$	$0.025\ 5^{c}$
	C_4	$0.531\ 6^{cd}$	$0.258\ 7^{c}$	$0.117\ 1^{d}$	$0.141\ 6^{d}$	$0.025\ 8^{c}$
	C_5	$0.543\ 4^{d}$	$0.294\ 3^{d}$	$0.114\ 8^{d}$	$0.179\ 5^{e}$	$0.026\ 3^{d}$
	C_6	$0.542\ 4^{d}$	$0.281\ 7^{d}$	$0.109\ 3^{e}$	$0.172\ 4^{e}$	$0.029\ 7^{e}$
15—30	C_0	$0.385\ 2^{a}$	$0.220\ 7^{a}$	$0.147\ 6^{a}$	$0.073\ 1^{a}$	$0.003\ 2^{a}$
	C_1	$0.391\ 3^{b}$	$0.231\ 8^{b}$	$0.144\ 4^{b}$	$0.087\ 4^{b}$	$0.010\ 3^{b}$
	C_2	$0.401\ 2^{b}$	$0.234\ 3^{b}$	$0.142\ 1^{b}$	$0.092\ 2^{b}$	$0.015\ 9^{c}$
	C_3	$0.431\ 7^{c}$	$0.258\ 7^{c}$	$0.130\ 8^{c}$	$0.127\ 9^{c}$	$0.018\ 5^{d}$
	C_4	$0.485\ 8^{d}$	$0.250\ 3^{c}$	$0.127\ 4^{d}$	$0.122\ 9^{c}$	$0.018\ 9^{d}$
	C_5	$0.496\ 6^{e}$	$0.293\ 7^{e}$	$0.124\ 8^{d}$	$0.168\ 9^{d}$	$0.023\ 7^{e}$
	C_6	$0.492\ 1^{e}$	$0.283\ 0^{d}$	$0.117\ 8^{e}$	$0.165\ 2^{d}$	$0.028\ 0^{f}$

向饱和土壤施加压力，当压力较小时，土壤水尚未排出，土壤含水量维持饱和；当压力增加到一定值的时候，土壤孔隙中的水开始向外排出，该临界负压值成为进气值[19]。参数 a 表示土壤进气值的倒数。参数 a 可利用 VG 模型对土壤水分特征曲线拟合求解得到。由水分特征曲线数据可知，0—15 cm 土层 C_0 的 a 值最小即进气值最大，但随着生物质炭施用量增加 a 值逐渐增大，C_6 处理 a 达到最高，C_5，C_6 处理与空白相比差异显著，15—30 cm 土层呈现出同样的势，C_6 处理的 a 值最高，其原因可能是由于供试土壤和质地较黏重，其进气值较大，未施生物质炭的处理质地较为黏重故 a 值最小，而随着生物质炭施用量

的增加,红壤容重高、质地黏重的性质得到改善,因此 a 值逐渐增大,进气值减小。

2.3　生物质炭与土壤水分特征参数的相关关系

经统计分析,生物质炭施用量与 0—15 cm 及 15—30 cm 土层的土壤饱和含水量均呈极显著线性正相关关系(相关系数分别为 0.888 0 和 0.943 0),表明随着生物质炭施用量的增加,旱地红壤的饱和含水量增加,这与颜永毫等[20]的研究结果一致。生物质炭施用量与与 0—15 cm 及 15—30 cm 土层的土壤田间持水量呈线性极显著正相关关系(相关系数分别为 0.980 0 和 0.958 0),相关性均达到极显著水平,表明田间持水量随生物质炭施用量的增加而增加,施用量为 30 t/hm^2 时土壤的田间持水量最高。生物质炭施用量与 0—15 cm 及 15—30 cm 土层凋萎系数之间均呈线性极显著负相关关系(相关系数分别为 −0.979 0和 −0.952 0),表明随着生物质炭施用量的增加,旱地红壤凋萎系数降低,土壤无效水含量减少。与田间持水量相同,生物质炭施用量与 0—15 cm 及 15—30 cm 土层土壤有效水含量之间呈线性极显著正相关关系(相关系数分别为 0.956 0 和 0.940 0),相关性均达到极显著水平,表明随着生物质炭施用量增加,土壤有效水含量逐渐增加,当施用量达到 30 t/hm^2 时土壤的有效水含量最高。

3　结 论

(1) 随着生物质炭施用量的增加,0—15 cm 土层及 15—30 cm 土层容重逐渐降低,土壤孔隙度、土壤有机碳含量逐渐升高,研究结果表明生物质炭为土壤保水透水以及作物生长提供了良好的条件。

(2) 随着生物质炭施用量的增加,0—15 cm 及 15—30 cm 土层各处理饱和含水量、田间持水量、有效水含量均逐渐增大,在生物质炭施用量达到 30 t/hm^2 (C_5)时达到最大,当施用量达到 40 t/hm^2 (C_6) 时各指标均有所下降,土壤的凋萎系数随着生物质炭施用量的增加逐渐减小。

(3) 经统计分析,生物质炭施用量与 0—15 cm 及 15—30 cm 土层土壤饱和含水量、田间持水量和有效水含量呈极显著正相关关系,而与凋萎系数呈极显著负相关关系。

[参 考 文 献]

[1] 孔宏敏,何圆球,吴大付,等. 长期施肥对红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(5):782-786.

[2] 姚贤良. 华中丘陵红壤的水分问题(I):低丘坡地红壤的水分状况[J]. 土壤学报,1996,33(3):249-257.

[3] 叶丽丽,王翠红,周虎,等. 添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J]. 土壤,2012,44(1):62-66.

[4] Piccolo A, Mbagwu J S C. Effects of different organic waste amendments on soil microaggregates stability and molecular sizes of humic substances[J]. Plant and Soil, 1990,123(1):27-37.

[5] 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.

[6] 李永涛,王文科,梁煦枫,等. 砂性漏斗法测定土壤水分特征曲线[J]. 地下水,2006,28(5):53-54.

[7] 李卫东,李保国,石元春. 区域农田土壤质地剖面的随机模拟模型[J]. 土壤学报,1999,36(3):289-300.

[8] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[9] 吴华山,陈效民,叶民标,等. 太湖地区主要水稻土水力特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2005,19(1):181-183.

[10] Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010,327(1/2):235-246.

[11] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferrasol amended with compost and charcoa [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(6):893-899.

[12] 刘祖香,陈效民,靖彦,等. 典型旱地红壤水力学特性及其影响因素研究[J]. 水土保持通报,2013,32(2):21-25.

[13] Brodowski S, Amelung W, Haumaier L, et al. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectroscopy [J]. Geoderma, 2005, 128(6): 116-129.

[14] 李力,刘娅,陆宇超,等. 生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J]. 环境化学,2011,30(8):1411-1421.

[15] 吴华山,陈效民,沃飞,等. 太湖地区水稻土的硝态氮穿透曲线及影响因素[J]. 土壤通报,2006,37(6):1129-1133.

[16] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2010.

[17] 杨金玲,张甘霖,赵玉国,等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响:以南京市为例[J]. 土壤学报,2006,43(1):33-38.

[18] 杜臻杰,齐学斌,陈效民,等. 生物质炭和猪场沼液对潮土水力特征参数的影响[J]. 水土保持学报,2014,(28):189-192.

[19] 王小华,贾克力,刘景辉,等. Van Genuchten 模型在土壤水分特征曲线拟合分析中的应用[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(2):179-183.

[20] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等. 生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(4):120-124.