

生物炭不同粒径及不同添加量对土壤收缩特征的影响

文 曼¹, 郑纪勇^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:土壤收缩特征在准确定量评价土壤结构和水力学特性中发挥重要作用。生物炭孔隙结构发达、比表面积巨大,施加生物炭不仅可以改变土壤的生物、化学性质,而且还影响到土壤的收缩特性。利用离心机法测定了添加不同粒径(2~1 mm, 1~0.25 mm, <0.25 mm)、不同比例(0, 10, 50, 100, 150 g/kg)生物炭的土壤收缩特征,并采用三直线模型进行了模拟,得出如下结果:相同压力下,土壤比容随着生物炭含量增加而增大,生物炭有效地限制了土壤收缩。土壤收缩变化过程适用三直线模型描述,伪饱和段和结构段的收缩特征值随生物炭含量增加而减小,超正常段的土壤特征值随生物炭含量增加而增大;生物炭粒径对土壤收缩特征值变化的影响不显著。研究表明,向土壤中添加生物炭能有效降低土壤干燥过程中的收缩程度,改善土壤结构,提高土壤持水性能。

关键词:生物炭; 土壤收缩特征; 三直线模型

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)01-0046-05

Effects of Different Sizes of Biochar and Their Addition Rates on Soil Shrinkage Characteristics

WEN Man¹, ZHENG Ji-yong^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil shrinkage characteristics play a key role in the quantitative evaluation on soil structure and hydraulic properties. Because of the highly developed porous structure and huge specific surface area, biochar addition into soil can not only change the soil biochemical properties, but also affect the soil shrinkage characteristics. In this paper, the effects of application of 3 biochar sizes (2~1 mm, 1~0.25 mm, <0.25 mm) and 5 application rates (0, 10, 50, 100, 150 g/kg) on soil shrinkage characteristics were examined by using centrifugal method. The relationships between the soil specific volume with the pressure and the water content were fitted by using power function and the three straight lines model, respectively. The results showed the power function and the three straight lines model could well simulate the changes of the soil specific volume with the pressure and the water content. The biochar addition significantly changed the soil shrinkage properties, and the soil specific volume increased with the rise of the biochar addition rates under the same pressure condition. The soil shrinkage characteristics values decreased with the increasing proportion of biochar application at the false saturated stage and structure stage, but it increased at the super normal stage. The effects of different particle sizes of biochar on the soil shrinkage characteristics were not statistically significant. The results indicated that addition of the biochar into soil could reduce the soil shrinkage during the soil desiccation and improve the soil structure and water retention capability.

Key words: biochar; soil shrinkage characteristics; three straight lines model

生物炭是在完全或部分缺氧以及相对低温(450~700℃)条件下通过热解将木材、草、玉米秆或其他

农作物废物炭化产生的一类高度芳香化难熔性固态物质^[1]。近年来更多研究发现生物炭对全球碳的生

收稿日期:2011-06-24

修回日期:2011-07-02

资助项目:国家自然科学基金(410171195);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10502-Z10-3)

作者简介:文曼(1987—),女,陕西西安人,硕士研究生,从事土壤水动力学相关研究。E-mail:wenmanxy@163.com

通信作者:郑纪勇(1974—),男,山东聊城人,副研究员,从事土壤中物质迁移方面研究。E-mail:zhjy@ms.iswc.ac.cn

物地球化学循环和缓解全球气候变化具有重要的影响,生物炭已被认为是大气 CO₂ 的重要储库^[2],生物炭还田可能成为人类应对全球气候变化的一条重要途径^[3]。另外作为土壤腐殖质中高度芳香化结构组分的可能来源,生物炭在稳定土壤有机碳库、增加土壤碳库容量、持留土壤养分、构筑土壤肥力、维持土壤生态系统平衡中也发挥着重要作用。生物炭孔隙结构发达、比表面积巨大,不仅可以改变土壤化学性质,而且影响土壤物理性质,如土壤的保水性和团聚体的形成等。

含黏粒的土壤,土壤含水量变化引起土壤容积变化,干燥时收缩,湿润时膨胀,影响土壤的结构和质量。农业土壤在干燥收缩过程中,产生表面下陷和裂隙,水分和溶质通过收缩裂隙被优先运移到下层土壤和地下水,导致水分和养分流失,引起地下水污染^[4]。根据土壤干湿变化可以预测田间地表收缩与膨胀,计算土壤含水量剖面,制定灌溉计划等^[5],因此土壤收缩特征变化引起广泛的关注。

本文用离心机法测定几种添加不同生物炭含量和粒径的土壤处理的收缩变化,并用三直线模型进行模拟,对比不同处理的土壤收缩特征曲线,分析生物炭对土壤结构和持水性能的影响,为生物炭还田的应用推广提供理论依据与参考。

1 基本理论

土壤的收缩特征可以通过土壤收缩特征曲线,即比容积 v (容重的倒数) 与质量含水量 U 的关系曲线来定量表达^[5]。从土壤容积变化速率考虑,定义土壤收缩特征值 m 为它的微分式,可表达为:

$$m = \frac{\partial V}{\partial V_w} = \frac{\partial v}{\partial U} \quad (1)$$

式中: V ——土壤的容积 (cm³); V_w ——土壤水的容积 (cm³); v ——比容积 (cm³/g); U ——质量含水量 (g/g); m ——容积损失—水损失曲线任一点的斜率,即等同于比容积—质量含水量曲线任一点处的斜率^[1,6]。

目前常用的土壤收缩过程模型是三直线模型 (Soil Shrinkage Characteristic Curve)^[7]。三直线模型 (图 1) 将土壤收缩过程分为结构段、正常段和滞留段三个部分,采用三条直线分别描述这三部分的收缩变化特征。三直线模型在每一收缩区段有它自身的数学特点和物理条件,且数学特点与物理条件具有一致性,获得的参数有其物理意义。三直线模型方程为:

$$\begin{cases} v = a + rU & 0 < U < U_A \\ v = k + nU & U_A \leq U \leq U_B \\ v = \gamma + sU & U_B < U < U_S \end{cases} \quad (2)$$

式中: r, n, s ——在滞留、正常、结构段内土壤收缩特征曲线的斜率,即三个收缩段的土壤收缩特征值; U_A, U_B, U_S ——滞留 (进气点) 拐点、结构 (膨胀极限) 拐点及饱和点处的质量含水量; a, k, γ ——经验常数。

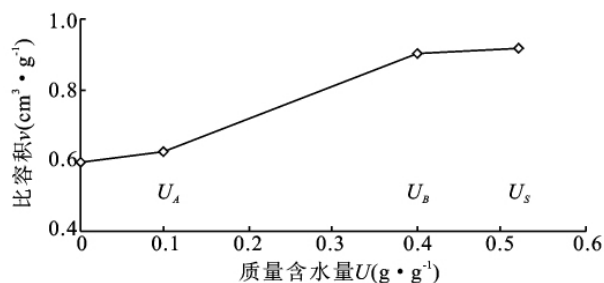


图 1 三直线模型的普通形式

2 材料与方法

2.1 供试材料

壤土,取自陕西省杨凌示范区中国科学院水利部水土保持研究所试验田,土样经风干过 2 mm 筛,测定土壤砂粒含量为 25.21%,粉粒含量为 43.88%,黏粒含量为 30.91%,为粉砂黏壤土。容重为 1.48 g/cm³。试验使用的生物炭为杂木黑炭,碳含量 80%~85%,由陕西亿鑫生物能源科技开发有限公司提供。

2.2 试验方法

将生物炭粉碎过筛,制备 2~1 mm, 1~0.25 mm, <0.25 mm 三种粒径,分别添加入土样,生物炭含量分别为 0, 10, 50, 100, 150 g/kg 土,每个处理重复 3 次。各处理土样按容重 1.24 g/cm³ 装入体积为 100 cm³ 的环刀中浸水饱和,然后放入 CR-21G 高速冷冻离心机中,根据设计压力设定离心机转速,加压范围为 10~1 000 kPa,分别为 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800, 1 000 kPa。每个压力下土样达到平衡后,取出称重,计算质量含水量,用游标卡尺测量土面到环刀顶部的高度以此确定土样收缩变化和容重变化。

2.3 数据分析

试验数据应用 Excel 进行作图,用 SAS 进行方差分析以及多重比较。

3 结果与分析

3.1 不同处理中压力与比容积的关系

测定过程中,加压减少土壤含水量的同时也改变

了土壤的容积,从而改变土壤容重。不同处理中,压力与比容积的关系如图 2 所示。根据压力与比容积

的关系曲线,采用幂函数关系($v=aS^b$)进行拟合,两者具有很好的一致性,其结果如表 1 所示。

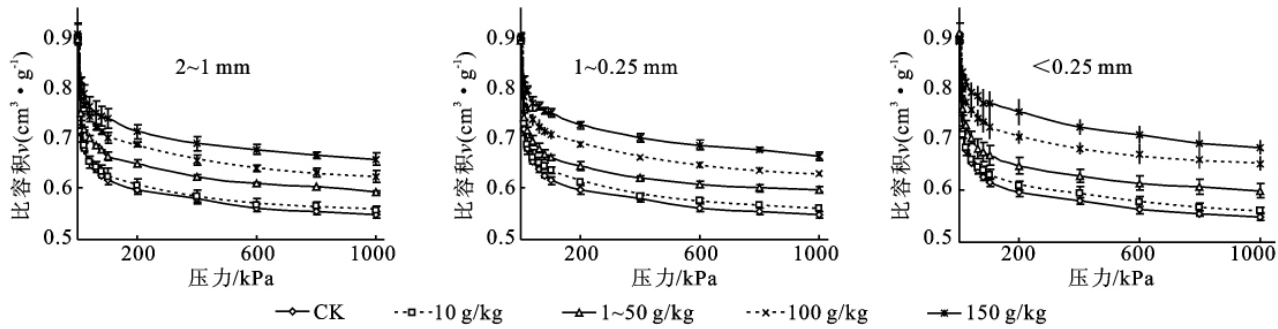


图 2 不同处理中压力与比容积的关系曲线

由图 2 可以看出,各处理的比容积—压力曲线变化特征相似,在低压力段(0~100 kPa)急剧下降,压力大于 100 kPa 后曲线变化相对平缓。比较不同粒径生物炭处理的曲线变化,在相同压力下,随着生物炭含量的增加,土壤比容积增大,说明施加生物炭可以抑制土壤收缩。

从表 1 中 a, b 系数值可得出: a 值表示近似饱和时(外部压力为 1 kPa)土壤的比容积变化,当土壤中生物炭含量为 10 g/kg 时,由于含量较少,土壤收缩情况与对照处理近似,差异不显著。相同粒径条件下,随着生物炭含量增加, a 值增大,比容积增大,容重减小,土壤收缩程度变小,且生物炭粒径越小,各处理间这种随生物炭含量变化的差异越显著。 b 值表示土壤比容积变化随压力变化的差异,即曲线坡度的

平缓陡直,对照处理曲线变化最大,基本随着生物炭含量增大,曲线变化越小。观察 v_L 值发现,相同粒径不同生物炭含量处理间,随着含量增加各处理 v_L 值显著增大;10 g/kg 和 50 g/kg 低生物炭含量情况下,不同粒径处理间的变化差异不显著,高生物炭含量情况下,<0.25 mm 生物炭粒径处理与其它两组差异显著。这是因为作为扰动土的对照处理,破坏了土壤的原有结构,中等孔隙较多,外部压力作用下容易压缩,压力逐渐增大的过程中,比容积减小的幅度最为明显。添加的生物炭由于具有多孔性和高比表面积,能够明显改变土壤结构和持水性能,特别是粒径<0.25 mm 的生物炭能增加土壤细孔隙,所以当土样中<0.25 mm 生物炭含量高于 100 g/kg 时,相同压力下,其比容积明显高于其它处理。

表 1 压力与比容积的幂函数关系拟合结果

粒径	压力/kg	a	b	R	v_L
2~1 mm	CK	0.7995±0.0076ef	-0.0551±0.0022f	0.9944±0.0041	0.5478±0.0036e
	10	0.7933±0.0125ef	-0.0517±0.0020def	0.9958±0.0014	0.5571±0.0047e
	50	0.8306±0.0028d	-0.0484±0.0005bcd	0.9964±0.0020	0.5926±0.0009d
	100	0.8865±0.0136bc	-0.0509±0.0037cdef	0.9962±0.0035	0.6222±0.0071c
	150	0.8957±0.0132ab	-0.0446±0.0010ab	0.9941±0.0025	0.6556±0.0063b
1~0.25 mm	10	0.8103±0.0091def	-0.0536±0.0012ef	0.9950±0.0083	0.5615±0.0006e
	50	0.8176±0.0059de	-0.0462±0.0009abc	0.9971±0.0036	0.5970±0.0032d
	100	0.8662±0.0050c	-0.0460±0.0001abc	0.9961±0.0023	0.6280±0.0022c
	150	0.8999±0.0044ab	-0.0430±0.0002a	0.9945±0.0017	0.6619±0.0047b
<0.25 mm	10	0.7878±0.0032f	-0.0488±0.0010bcde	0.9982±0.0025	0.5610±0.0032e
	50	0.8375±0.0063d	-0.0491±0.0012bcde	0.9932±0.0103	0.5978±0.0076d
	100	0.8779±0.0076bc	-0.0430±0.0011a	0.9946±0.0021	0.6500±0.0076b
	150	0.9172±0.0104a	-0.0413±0.0015a	0.9849±0.0081	0.6811±0.0078a

注: a, b ——拟合系数; R ——相关系数; v_L ——1 000 kPa 压力时的比容积,即最终比容积。

3.2 不同处理中土壤的收缩特征变化

土壤脱水过程中,由于承受一定的压力,土壤含水量减小的同时土壤容积减小,容重不断增大,是一个干燥收缩的过程。土样容积的变化一方面是由于承受外部压力,一方面是由于水分被排出改变了土体

的结构。离心机法测定土壤收缩特征时,通过设定离心机转速来获得设定压力,且相对平衡的时间较短,因此有关研究^[8]用比容积—质量含水量曲线在任一点处的斜率的大小对三直线模型进行了改进,将土壤收缩特征曲线划分为:伪饱和段、结构段、超正常段。

在接近饱和段时土壤收缩段称为伪饱和段,由于土壤不可能完全达到饱和状态,特别是原状或田间土壤,一般土壤收缩特征值接近 1;与伪饱和段相接且含水量较高时,土壤收缩特征值小于 1 的收缩段称为结构段;在外力作用下土壤收缩特征值大于 1 就把它称作超正常段。每一段都可以用直线来描述。根据试验数据绘制土壤的收缩特征曲线,如图 3—4 所示。

根据土壤收缩变化及特征值,土壤收缩特征变化曲线分为“伪饱和段”、“结构段”及“超正常段”3 个收缩段,并用直线方程来表示:

$$v=k+nU$$

式中: k, n ——拟合系数,拟合结果见表 2。

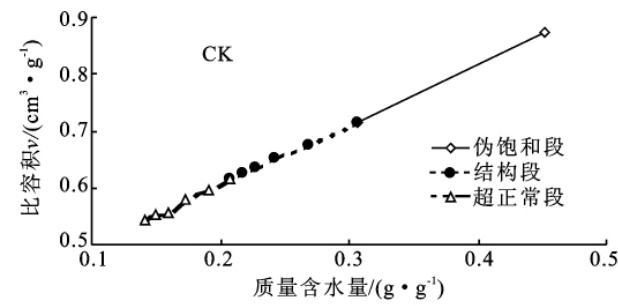


图 3 各处理的收缩特征曲线

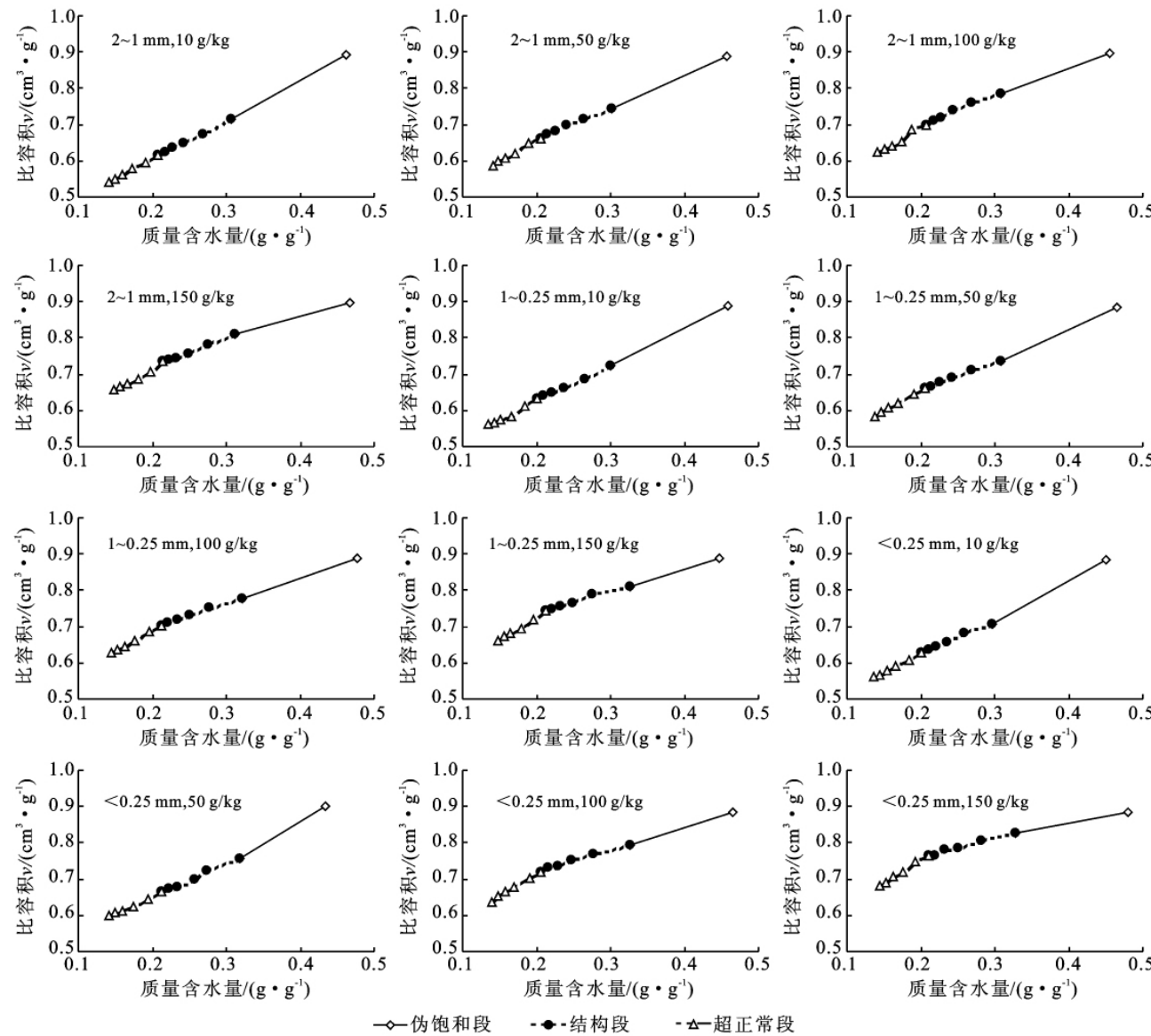


图 4 各处理的收缩特征曲线

由图 3—4 和表 2 可以看出,实测数据与三直线模型具有较好的相关性,相关系数大于 0.96,说明添加生物炭的土壤的收缩特征可以用三直线模型描述。将表 2 结果结合测定中的压力值进行分析,发现 0~10 kPa 压力范围为伪饱和段,对照处理的伪饱和段收

缩特征值 n_w 约等于 1,随着生物炭含量增加, n_w 减小,变化差异显著,土壤容积变化小于水分变化,土壤收缩受水分散失控制,土壤的收缩程度也随着生物炭含量增加而减小。10~100 kPa 压力范围为结构段,100~1 000 kPa 压力范围为超正常段。对照处理在

结构段的收缩特征值 n_j 小于但接近 1,土壤收缩变化主要受水分散失控制。在超正常段收缩特征值 n_c 大于 1,土壤容积的变化大于水分容积变化,说明此时土壤收缩受水分散失和外加压力两者控制,且压力起着主导作用。与对照相比较,同粒径生物炭的处理,生物炭含量增加, n_j 减小, n_c 增大。同时随着生物炭含量增加,结构段的土壤收缩程度减小,而超正常段土壤的收缩程度变大。从图中也可以看出,随着生物炭含量增加,收缩特征曲线的三直线段区分越明显。生物炭影响对土壤收缩特征推测原因可能是由于生物炭具有巨大的比表面积,结构孔隙发达,能够吸附土壤中的水和无机离子,吸附土壤颗粒,特别是小粒径的生物炭能够与土壤颗粒形成一定的微小团粒结构,增加土壤对水分子的吸着能力,形成大量细小的封闭孔隙。在伪饱和段,外部施加压力相对较小,大

孔隙中的水分首先被压缩散失,土壤收缩受水分散失控制,生物炭含量多的土壤封闭微孔隙多,土壤收缩程度小,收缩特征值小。结构段,压力作用下土壤微孔隙中的水分被逐渐排出,但由于生物炭颗粒自身吸水膨胀,虽然这种膨胀体积不明显,但是在同样压力作用下,生物炭颗粒比土壤颗粒更能保持颗粒体积大小不被压缩。超正常段,外加压力明显,土壤进一步紧实,生物炭颗粒也开始被压缩,所以生物炭含量越多的土壤收缩程度反而越明显,收缩特征值越大。

而相同含量下比较不同粒径生物炭对土壤收缩特征的影响发现,伪饱和段和结构段各处理之间的变化差异不显著,以此推断在中低压力段影响土壤收缩变化的因素中,向土壤中添加不同粒径生物炭改变土壤结构所引起的土壤收缩特征变化,远不及生物炭含量引起的变化显著。

表 2 土壤收缩特征的拟合结果

粒径/ 生物碳含量/		超正常段			结构段		
mm	(g·kg ⁻¹)	n_c	k_c	R_c	n_j	k_j	R_j
2~1	CK	1.0924±0.0473k	0.4018±0.0019e	0.9785±0.0091	0.9804±0.0869a	0.4054±0.0269i	0.9925±0.0036
	10	1.1072±0.0866j	0.4125±0.0048e	0.9782±0.0080	0.8654±0.0557ab	0.4433±0.0140hi	0.9810±0.0058
	50	1.0840±0.1148l	0.4398±0.0166cd	0.9812±0.0074	0.8482±0.0237abc	0.4898±0.0102fgh	0.9884±0.0060
	100	1.2252±0.0241e	0.4452±0.0091cd	0.9686±0.0086	0.8961±0.1106ab	0.5145±0.0302def	0.9798±0.0050
	150	1.2415±0.2371c	0.4806±0.0262b	0.9800±0.0069	0.7781±0.0507bc	0.5652±0.0267bcd	0.9818±0.0083
1~0.25	10	1.0919±0.0474k	0.4105±0.0088e	0.9741±0.0121	0.9109±0.0136ab	0.4478±0.0013fgi	0.9771±0.0168
	50	1.1212±0.0404i	0.4599±0.0080bc	0.9748±0.0027	0.7664±0.0033bcd	0.5029±0.0052efg	0.9839±0.0010
	100	1.1259±0.0670h	0.4636±0.0040bc	0.9915±0.0018	0.6837±0.0509cde	0.5588±0.0200cde	0.9741±0.0135
	150	1.2738±0.0136b	0.4729±0.0070b	0.9887±0.0042	0.5962±0.0656de	0.6188±0.0200ab	0.9688±0.0171
<0.25	10	1.1378±0.0263g	0.4185±0.0010de	0.9866±0.0026	0.8208±0.0162bc	0.4643±0.0067fgh	0.9929±0.0021
	50	1.1955±0.0139f	0.4441±0.0194cd	0.9935±0.0033	0.7462±0.0359bcd	0.5175±0.0091def	0.9921±0.0056
	100	1.2341±0.1027d	0.5053±0.0113a	0.9789±0.0055	0.5980±0.0314de	0.6003±0.0197abc	0.9615±0.0235
	150	1.3764±0.1383a	0.4815±0.0106ab	0.9797±0.0096	0.5218±0.0418e	0.6562±0.0211a	0.9631±0.0115
粒径/ 生物碳含量/		伪饱和段			节点处质量含水量		
mm	(g·kg ⁻¹)	n_w	k_w	$U_A/\%$	$U_B/\%$	$U_C/\%$	$U_S/\%$
2~1	CK	1.0421±0.0721a	0.3623±0.0256e	14.17±0.23	20.77±0.49	30.62±0.60	46.27±0.44
	10	1.0261±0.0817a	0.3450±0.0431e	14.12±0.30	20.74±0.43	30.94±0.64	46.32±0.50
	50	0.9130±0.0140b	0.4693±0.0067d	14.05±0.14	20.52±0.33	30.16±0.36	45.75±0.41
	100	0.7562±0.0193c	0.5538±0.0084c	14.21±0.18	20.71±0.33	30.81±0.49	45.52±1.15
	150	0.5691±0.0501d	0.6298±0.0250ab	14.81±0.34	21.41±0.54	31.15±1.00	46.67±1.99
1~0.25	10	1.0230±0.0378a	0.4189±0.0128de	13.42±0.46	20.09±0.36	29.92±0.09	45.85±0.49
	50	0.9506±0.0206b	0.4441±0.0101d	13.83±0.08	20.55±0.19	30.81±0.39	46.46±0.31
	100	0.7262±0.0177c	0.5420±0.0132c	14.40±0.46	21.25±0.70	32.18±1.18	47.75±1.06
	150	0.6713±0.0610dc	0.5897±0.0245bc	14.78±0.58	21.20±0.55	32.58±1.11	44.73±0.10
<0.25	10	1.1671±0.0256a	0.3599±0.0124e	13.61±0.02	20.09±0.04	29.59±0.35	45.04±0.25
	50	0.9664±0.0388b	0.4438±0.0740d	14.16±0.30	21.24±0.50	31.75±1.32	43.33±2.78
	100	0.6710±0.0388dc	0.5734±0.0229bc	13.95±0.30	20.66±0.48	32.60±0.74	46.47±1.49
	150	0.3890±0.0800e	0.6944±0.0425a	14.52±0.45	21.01±0.73	32.76±1.97	48.09±2.13

注: R ——相关系数; U_A, U_B, U_C ——各直线段拐点的质量含水量; U_S ——饱和点的质量含水量; $n_w, k_w, n_j, k_j, n_c, k_c$ ——伪饱和段、结构段、超正常段三直线段的拟合系数。

量较小,胸径较大,胡杨长势呈衰退趋势。

(4)分析不同深度土壤含水量的水平空间分布格局得出,各土层含水量在水平空间分布上存在明显的空间差异,各层在大体上呈自西向东逐渐增加的趋势。鼎新绿洲各土层土壤含水量值高于金塔绿洲。各土层土壤含水量水平空间分布随离水源地距离的增加而降低。

致谢:感谢研究生安建科、张平、朱小娟、赵敏丽以及本科生王允、杨泉、王作栋、苏有才等人参与野外采样。

参考文献:

- [1] 常学向,赵爱芬,赵文智,等.黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况[J].水土保持学报,2003,17(2):126-129.
- [2] 马晓东,李卫红,朱成刚,等.塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征[J].生态学报,2010,30(15):4035-4045.
- [3] 李禄军,蒋志荣,车克钧,等.绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J].水土保持学报,2007,21(1):123-127.
- [4] 贾宝全,慈龙骏,蔡体久,等.绿洲—荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究[J].植物生态学报,2002,26(2):203-208.
- [5] 马海艳,龚家栋,王根绪,等.干旱区不同荒漠植被土壤水分的时空变化特征分析[J].水土保持研究,2005,12(6):231-234.
- [6] 萨如拉,豪树奇,张秋良,等.额济纳胡杨林土壤含水量时空变化的研究[J].林业资源管理,2006(1):59-62.
- [7] 席海洋,冯起,司建华,等.额济纳绿洲不同植被覆盖下土壤特性的时空变化[J].中国沙漠,2011,31(1):68-75.
- [8] 霍华丽,刘普幸,张克新,等.瓜州绿洲胡杨林下土壤水分空间特征研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(2):152-155.
- [9] 张克新,刘普幸,霍华丽,等.河西走廊敦煌绿洲天然胡杨林土壤水分空间变化特征研究[J].水土保持研究,2010,17(5):109-113.
- [10] 康向阳.甘肃胡杨恢复发展的限制因子及对策[J].中国沙漠,1997,17(1):53-57.
- [11] 肖德安,王世杰.土壤水研究进展与方向评述[J].生态环境学报,2009,18(3):1182-1188.
- [12] 张正铎.空间变异理论与应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [13] 杨劲松,姚荣江.黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J].地理科学,2007,27(3):348-353.
- [14] 孙雪新,康向阳,李毅,等.甘肃省胡杨资源现状及发展[J].自然资源,1992(4):51-56.
- [15] 魏庆苒.胡杨[M].北京:中国林业出版社,1990:1-17.
- [16] 莫保儒,蔡国军,赵廷宁,等.甘肃半干旱黄土丘陵沟壑区人工植被土壤水分研究[J].水土保持研究,2009,16(6):125-128.
- [17] 叶茂,徐海量,龚君君,等.不同胸径胡杨径向生长的合理生态水位研究[J].地理科学,2011,31(2):172-177.
- [18] 张秋岭.额济纳绿洲胡杨林群落特征与土壤水分的关系[D].北京:北京林业大学,2008.

(上接第50页)

4 结论

(1)土壤的比容和压力变化曲线可用幂函数关系描述。在相同压力下,随着生物炭含量的增加,土壤比容增大,土壤收缩程度减小。

(2)添加生物炭的土壤,其收缩特征变化可以用三直线模型描述。伪饱和段和结构段的土壤特征值随生物炭含量增加而减小,超正常段的土壤特征值随生物炭含量增加而增大。不同生物炭粒径对土壤收缩特征值变化的影响不显著。

(3)土壤中添加生物炭能有效降低土壤干燥过程中的收缩程度,改善土壤结构,提高土壤持水性能。

参考文献:

- [1] Antal M J, Gronli M. The art, science and technology of charcoal production[J]. Industrial and Engineering Chemistry,2003,42:1619-1640.
- [2] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. Science of the Total Environment,2006,370:190-206.
- [3] Lehmann J. A handful of carbon[J]. Nature,2007,443:143-144.
- [4] 吕殿青,邵明安.土壤干湿收缩特征研究进展[J].土壤通报,2003,34(3):225-228.
- [5] Mitchell A R, Van Genuchten M T. Shrinkage of bare and cultivated soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1992,56:1036-1042.
- [6] McGarry D, Malafant K W J. The analysis of volume change in unconfined unite of soil[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1987,51:290-297.
- [7] 邵明安,吕殿青.土壤收缩特征曲线的实验研究[J].土壤学报,2003,40(3):471-474.
- [8] 吕殿青,王宏,王玲.离心机法测定持水特征中的土壤收缩变化研究[J].水土保持学报,2010,24(3):209-212.