

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.025

生物炭对不同坡度坡耕地土壤水动力学参数的影响

魏永霞^{1,2} 王 鹤¹ 吴 昱^{3,4} 刘 慧^{2,5}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090; 4. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040;
5. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 在3种地形坡度条件下,开展了施加生物炭后连续两年的土壤水动力学效应试验研究,探究不同坡度坡耕地施加生物炭当年和次年对土壤水分常数、土壤水分特征曲线、比水容量、非饱和导水率 $K(h)$ 和非饱和扩散率 $D(\theta)$ 的影响。结果表明:施用生物炭当年和次年均使土壤田间持水率和饱和含水率增大,且随坡度增加其增率变大,生物炭因子两年内对土壤水分常数的影响显著($P < 0.015$),而坡度因子影响不显著($P > 0.05$),即生物炭因子作用更明显;施用生物炭两年内,在各个土壤吸力条件下土壤含水率均增大,土壤持水性增强,且同地形坡度呈正相关关系、同年限呈负相关关系;生物炭在两年内均增大土壤比水容量,使其供水能力加强,最大增量 $1.830\ 207 \times 10^{-3}\text{ cm}^3/\text{cm}^4$;地形坡度对 $K(h)$ 无明显影响,但施加生物炭可使 $K(h)$ 增大,土壤导水性增强,2016、2017年 $K(h)$ 最高分别增加239.61%、164.04%;施加生物炭可降低 $D(\theta)$,抑制土壤水分的水平运动,随地形坡度增加抑制效果增强。生物炭施用当年对各土壤水动力学参数的影响大于施用次年。研究结果可为东北黑土区坡耕地农业水土保护和利用提供理论依据。

关键词: 秸秆生物炭; 不同坡度; 黑土区; 土壤水动力学参数; 后效应

中图分类号: S156.2; S152.7⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)03-0231-10

Effect of Biochar on Soil Hydrodynamic Parameters under Different Slopes

WEI Yongxia^{1,2} WANG He¹ WU Yu^{3,4} LIU Hui^{2,5}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150030, China
3. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Research Institute, Harbin 150090, China
4. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China
5. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the effect of applying biochar on the post-effects of soil hydrodynamic parameters on different slopes, the experimental study on soil hydrodynamic effects was carried out for two consecutive years after the application of biochar under three kinds of terrain slope conditions. The effects of biochar applied to different slopes on soil water constant, soil water characteristic curve, specific water capacity, unsaturated hydraulic conductivity $K(h)$ and unsaturated diffusion rate $D(\theta)$ were investigated. The results showed that the application of biochar could increase the soil water holding capacity and saturated water content in the same year and the next year, and the growth rate was increased with the increase of slope. Biochar factors had significant effects on soil water constants within two years ($P < 0.015$), while slope factors had no significant effect ($P > 0.05$), which meant that biochar factors were more pronounced. Within two years, the soil moisture content was increased under various soil suction conditions, soil water holding capacity was increased, and it was positively correlated

收稿日期: 2018-08-01 修回日期: 2018-08-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)和东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2017009)
作者简介: 魏永霞(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com
通信作者: 刘慧(1981—),女,副教授,博士,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

with slope of terrain and negatively correlated with age. Biochar increased the soil specific water capacity within two years, and the water supply capacity was strengthened, the maximum water capacity increase was $1.830\,207\times10^{-3}\text{ cm}^3/\text{cm}^4$. The slope of terrain had no obvious effect on $K(h)$, but the application of biochar could increase $K(h)$ and the soil water conductivity was enhanced. In 2016 and 2017, $K(h)$ was increased by a maximum of 239.61% and 164.04%, respectively. The application of biochar could reduce $D(\theta)$ and inhibit the horizontal movement of soil moisture. As the increase of slope of terrain, the suppression effect was enhanced. The effect of biochar application on the soil hydrodynamic parameters in the first year was greater than that in the next year. The research results can provide a theoretical basis for the protection and utilization of agricultural soil and water in sloping farmland in the black soil region of Northeast China.

Key words: straw biochar; different slopes; black soil region; soil hydrodynamic parameters; post effect

0 引言

生物炭是指在限氧或无氧的环境条件下,通过高温(一般小于700℃)裂解将小薪柴、农作物秸秆、杂草等生物质经碳化而形成的一种稳定难溶、高度芳香化、碳含量极其丰富(高达60%)的固态产物^[1]。早有研究表明,将生物炭施入土壤,可降低土壤容重、提高总孔隙率,这种结构改变对土壤持水能力也产生一定影响,如提高土壤含水率和降水的人渗量等^[2],特别是土壤中有效水含量的增加更利于作物的生长^[3-4];生物炭的吸湿能力比土壤高1~2个数量级^[5],使含有生物炭的土壤比普通土壤田间持水率高约18%^[6]。通常认为,生物炭对土壤物理结构等性状的改良以及对土壤水分的影响均与生物炭自身具有多孔结构和吸附能力密不可分^[7-8]。随着生物炭对土壤性质改良、土壤水分调控等研究的进一步深入,部分研究逐渐着眼于生物炭对土壤水动力学参数的影响,如田丹等^[9]在研究中得出,添加0.05、0.10、0.15 g/g的秸秆木炭和花生壳炭均可有效减小土壤水分扩散率,增加粉砂壤土的土壤持水性。刘志凯^[10]在研究中也发现,当土壤体积分含水率小于 $0.4\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,生物炭抑制土壤水分扩散率,当土壤体积分含水率大于 $0.4\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,生物炭则提高土壤水分扩散率,且生物炭可增加土壤的非饱和导水率,提高其导水能力。

位于我国松花江流域和辽河流域的东北黑土区是全球三大黑土区之一,东北黑土区土壤主要以黑土、黑钙土和草甸黑土为主,黑土土壤肥沃、高产且结构性好,具有东北地区主要农作物生长所需的适宜土壤条件^[11]。但随着黑土区水土流失现象日益严重,黑土耕层逐步变薄,使土壤中有机质含量下降,土壤一系列理化性状也逐渐恶化,使土壤容重增大、孔隙度减小,进而大大降低了土壤持水性能^[12]。东北黑土区耕地中有60%为2°~5°坡耕地^[13],多年以来人们过度开垦和掠夺式经营导致水土流失加

剧,使黑土区农作物实际平均产量仅为潜在产量的48.49%^[14],东北黑土区作为我国粮食主要生产基地,改善其土壤性质、促进其土壤水分向作物所需方向运动,以保证粮食安全已刻不容缓。生物炭作为土壤改良剂、土壤保水剂、导水剂等,将会改善此现象^[15-16]。

目前针对生物炭对土壤水动力学参数影响的研究多集中在无坡度土壤的一年试验中,对于不同坡度土壤水动力学参数在施加生物炭后两年及以上的研究较少。本文对不同坡度坡耕地黑土中添加适量生物炭,研究分析坡度变化和添加生物炭后两年内对土壤水动力学参数的影响,并使用HYDRUS-1D软件模拟土壤水分运动情况,以期高效利用东北黑土区坡耕地农业水土资源提供相应理论依据与方法。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黑龙江省水利科学研究院综合试验基地(45°43'09"N,126°36'35"E),总面积55 hm²,多年平均气温3.1℃,无霜期130~140 d,多年平均水面蒸发量796 mm,耕地土壤多以黑土为主,入渗能力弱。年平均降水量介于400~650 mm,多集中在7—9月,且历时较短,仅7—9月的降水量就占全年降水总量的70%以上。供试土壤主要为黑土,速效氮(N)质量比为154.4 mg/kg,速效磷(P₂O₅)质量比为40.1 mg/kg,速效钾(K₂O)质量比为376.8 mg/kg,pH值7.27。0~80 cm土层平均田间持水率(质量分数)为29.4%,土壤干容重为1.22 g/cm³。大豆是该地区主要农作物之一。

1.2 试验材料

供试生物炭购于辽宁金和福开发有限公司,使用玉米秸秆在450℃无氧条件下烧制而成,其基本理化性质如表1所示。供试大豆品种为黑河3号。

表 1 生物炭的基本性质
Tab.1 Basic feature of biochar

供试生物炭	粒径/mm	全碳质量 分数/%	全氮质量 分数/%	全磷质量 分数/%	全钾质量 分数/%	灰分质量 分数/%	pH 值
玉米秸秆生物炭	1.5~2.0	70.38	1.53	0.73	1.66	25.70	9.36

1.3 试验设计

试验在黑龙江省水利科学研究院综合试验基地的径流小区内进行,小区规格为 2 m×5 m,坡度选择 1.5°、3°、5°共 3 种在东北黑土区比较有代表性的坡度。每种坡度的径流小区分别设置施加生物炭和不施加生物炭处理,小区编号分别为 T1.5、T3、T5 和 CK1.5、CK3、CK5,共计 6 个小区。根据前期研究成果^[16],生物炭施用量选择施用当年效果较好的 75 kg/hm²,施用时间为 2016 年,2017 年不再施加。生物炭施用方法为播种前将生物炭粉均匀铺撒于土壤表面,人工搅拌至与 0~20 cm 表层土壤充分均匀混合后静止待用。

1.4 测定参数及方法

各参数测定按坡上、坡中、坡下 3 点取样,取其平均值,每个样点 3 次重复。

1.4.1 土壤水分常数

采用环刀法和干燥法测定田间持水率和饱和含水率。使用环刀在径流小区各位置点取深度 15~20 cm 处土壤作为试验土样,将土样带回室内处理后,采用干燥法测量土壤含水率。

1.4.2 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线 (Soil water characteristic curve, SWCC)采用离心机法进行测定。使用 CR21-GIII 型高速离心机配套环刀取样带回,环刀土样处理后放入盛有蒸馏水的容器中浸泡 12 h,水面低于环刀上缘 2 mm,土壤达饱和后取出环刀离心备用。离心机转速设定为 310、540、690、980、1 700、2 190、3 100、5 370、6 210、6 930、8 210、9 300 r/min,相对应平衡时间为 10、12、16、26、42、49、58、73、77、80、85、89 min,每次离心结束后将离心的水分擦去,然后将环刀与土样一同称量并记录数据。

目前应用最为广泛的推求土壤水分特征曲线的模型是 Van Genuchten 模型,表达式为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$$

(1)

为了更加明显地显示体积含水率与负压水头间的关系,将式(1)转换为

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

(2)

其中

$$\alpha = \frac{1}{h_b}$$

(3)

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

(4)

式中

θ ——体积含水率,cm³/cm³

h ——负压水头,cm

θ_r ——残余含水率,cm³/cm³

θ_s ——饱和含水率,cm³/cm³

α 、 n 、 m ——经验拟合参数(或曲线性状参数),其中 α 为进气值倒数

h_b ——进气吸力,cm

1.4.3 土壤饱和和导水率

土壤饱和和导水率(K_s)采用定水头法测定。所用设备为自制马氏瓶和内径 10 cm、高 80 cm 的有机玻璃筒(图 1)。进行试验装土时,先在有机玻璃筒壁涂满凡士林后,将土柱内壁边缘土壤压实,确保无边缘效应。试验过程中,马氏瓶作为供水系统装置将供水水头控制在 200 cm。在定水头作用下放置一段时间,待出水管管口有水溢出且保持均匀出水量时,则认为土样已达饱和,此时开始试验,各处理每隔 60 min 测量一次出流量,并记录数据。

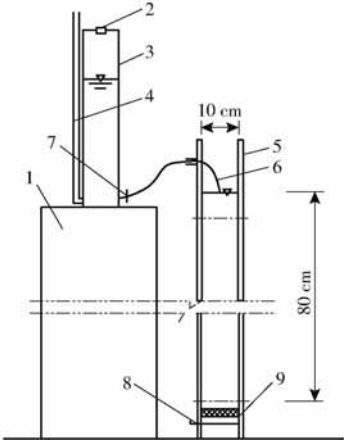


图 1 土壤饱和和导水率试验装置示意图
Fig.1 Schematic of experimental device for soil saturated hydraulic conductivity

- 1.平台 2.进水口 3.马氏瓶 4.进气管 5.土柱 6.滴水管
7.止水阀 8.排水孔 9.滤层

土壤饱和和导水率计算公式为

$$K_s = \frac{VL}{HA t}$$

(5)

式中

K_s ——土壤饱和和导水率,cm/min

V ——一定时间下出流量,cm³

L ——土样长度,cm

H ——水头差,cm
 A ——土样截面积,cm²
 t ——渗流时间,min

1.4.4 土壤非饱和导水率

土壤非饱和导水率直接测量十分困难且复杂,故采用间接公式推求方法来获取。根据 Van Genuchten 模型及土壤饱和导水率可计算出土壤非饱和导水率理论值

$$K(h) = \frac{K_s \{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha h)^n]^{m/2}} \quad (6)$$

式中 $K(h)$ ——土壤非饱和导水率,cm/min

1.4.5 土壤非饱和水分扩散率

土壤非饱和水分扩散率采用水平土柱法测定。所用装备示意图如图 2 所示,自制带通气管的马氏瓶与直径 5 cm、长 60 cm 的圆柱透明有机玻璃管,在装土过程中,要保证各处理填装过程都与对照组具有统一的击实次数和击实压力。各处理土壤均分层装入试验装置的透明有机玻璃管中,填装过程也要保证各处理土壤的均一性。供水系统依然由马氏瓶供水,待湿润峰到达整个土柱的 2/3 (40 cm) 时,关闭供水阀并记录试验结束时间,同时按节取出土壤,用干燥法测定土壤含水率,记录试验数据。

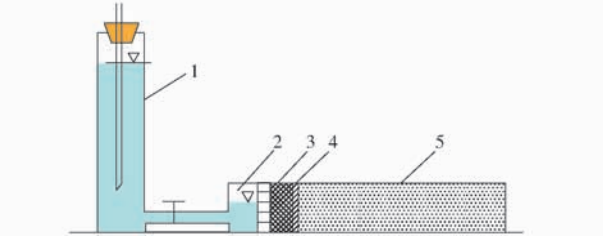


图 2 土壤水分扩散率试验装置示意图
Fig.2 Schematic of experimental device for soil water diffusion rate

1. 马氏瓶 2. 储水室 3. 滤料室 4. 过滤板 5. 土柱

水平入渗是测定土壤水分扩散率非稳定流的一种方法,此法利用水平土柱吸渗试验数据,再结合解析法计算出土壤水分扩散率。采用 Boltzmann 变换,对一维水平流动微分方程求解,得出

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{d\xi(\theta)}{d\theta} \int_{\theta_a}^{\theta} \xi(\theta) d\theta \quad (7)$$

将式(7)转换为差分的形式

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{\Delta\xi(\theta)}{\Delta\theta} \sum_{\theta_a}^{\theta} \xi(\theta) \Delta\theta \quad (8)$$

式中 $D(\theta)$ ——土壤非饱和水分扩散率,cm²/min
 θ_a ——初始土壤含水率,cm³/cm³
 ξ ——Boltzmann 变换参数

1.4.6 比水容量

对 Van Genuchten 模型式(2)两边同时求导即可得到土壤的比水容量

$$C(h) = -\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) mn \alpha |\alpha h|^{n-1}}{[1 + |\alpha h|^n]^{m+1}} \quad (9)$$

式中 $C(h)$ ——土壤比水容量,cm³/cm⁴

1.5 数据处理方法

采用 Excel 2010、Origin 9.1 进行基本数据处理和绘图,利用 SPSS 19.0 进行拟合度检验和显著性分析,显著性水平为 0.05、0.01,用 HYDRUS-1D 软件对土壤水分运动情况进行拟合。

2 结果与分析

2.1 生物炭对坡耕地土壤水分常数的影响

2016、2017 年各处理饱和含水率和田间持水率如表 2 所示。无施加生物炭条件下随地形坡度增加饱和含水率与田间持水率减小,与已有结果一致^[17]。施加生物炭当年饱和含水率与田间持水率均有所增加,且随地形坡度增加二者变幅增强,坡度为 1.5°、3°、5°时田间持水率增加率分别为 4.89%、7.35%、10.98%,饱和含水率增加率分别是 10.91%、15.10%、16.46%。施加生物炭次年饱和含水率与田间持水率也均有增加,且随地形坡度增加二者变幅增强,坡度为 1.5°、3°、5°时田间持水率增加率分别为 6.69%、10.03%、11.94%,饱和含水率增加率分别为 11.91%、15.48%、16.18%。

表 2 各处理的土壤水分常数
Tab.2 Soil moisture constants of each treatment
cm³/cm³

处理	饱和含水率		田间持水率	
	2016 年	2017 年	2016 年	2017 年
CK1.5	0.435 4	0.429 1	0.333 5	0.323 1
T1.5	0.482 9	0.480 2	0.349 8	0.344 7
CK3	0.424 4	0.417 3	0.326 4	0.317 2
T3	0.488 5	0.481 9	0.350 4	0.349 0
CK5	0.421 1	0.415 4	0.322 3	0.314 1
T5	0.490 4	0.482 6	0.357 7	0.351 6

施加生物炭增大了两土壤水分常数,这与生物炭自身具有较低容重、较高的吸水能力密不可分,生物炭降低土壤容重,增加土壤孔隙度,使土壤含水率增加、土壤储水空间变大,进而提高土壤持水能力。随地形坡度增加两土壤水分常数增幅增大,这是因为地形坡度越大,地表径流和地下水更容易流失,土壤水土流失情况越加严重,生物炭的强吸附性可使更多流失的水分留于土壤中,对土壤持水性改善能力更大。但 2017 年数值均较 2016 年有小幅减少,这与施加生物炭后的年限有关。

为进一步分析坡度和是否施加生物炭两因素对各土壤水分常数影响的显著程度,分别建立 2016 年

饱和含水率(y_{11})、田间持水率(y_{21})和 2017 年饱和含水率(y_{12})、田间持水率(y_{22})关于坡度和是否施用生物炭的回归方程,其中坡度因子(x_1)为定量变量,施用生物炭(x_2)为定性变量, x_2 取 0 表示不施用生物炭,取 1 表示施用生物炭,得出回归方程分别为

$$y_{11}=0.430-0.002x_1+0.6x_2$$

$(R^2=0.976,F=62.25,P=0.004)$ (10)

$$y_{21}=0.329-0.001x_1+0.25x_2$$

$(R^2=0.905,F=14.23,P=0.029)$ (11)

$$y_{12}=0.425-0.003x_1+0.061x_2$$

$(R^2=0.985,F=100.26,P=0.002)$ (12)

$$y_{22}=0.319-0.001x_1+0.03x_2$$

$(R^2=0.955,F=31.78,P=0.010)$ (13)

4 个方程的 R^2 均大于 0.9, P 值均小于 0.05,表明回归方程拟合效果较好。从两个变量的显著性看,生物炭施用当年,坡度对饱和含水率和田间持水率的影响均不显著(P 分别为 0.653、0.823),而是否施用生物炭对饱和含水率影响极显著($P =$

0.002),对田间持水率的影响也达显著程度($P = 0.013$);生物炭施用次年,坡度对饱和含水率和田间持水率的影响均不显著(P 分别为 0.381、0.841),而是否施用生物炭对饱和含水率和田间持水率影响均为极显著(P 分别为 0.001、0.004)。说明是否施用生物炭对饱和含水率和田间持水率的影响显著,坡度因子则不显著。

2.2 生物炭对坡耕地土壤持水性的影响

2.2.1 土壤水分特征曲线的拟合参数

土壤水分特征曲线可较好地反映土壤持水性能,采用 HYDRUS-1D 软件中 Van Genuchten 模型对各处理土壤水分特征曲线进行拟合,得到 2016、2017 年拟合参数及决定系数,如表 3 所示,各处理决定系数 R^2 均大于 0.99,表明 HYDRUS-1D 软件中 Van Genuchten 模型对各处理均适用。同时从表 3 可看出,生物炭对参数 θ_s 和 α 有增大的作用,对参数 θ_r 和 n 有减小的作用,且参数 θ_s 、 θ_r 和 n 的变幅与坡度呈正相关,参数 α 的变幅与坡度呈负相关。

表 3 各处理 Van Genuchten 模型的拟合参数
Tab.3 Fitting parameters of Van Genuchten model for each treatment

年份	处理	饱和含水率 $\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	残余含水率 $\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	进气值倒数 α/cm^{-1}	性状参数 n	R^2
2016	CK1.5	0.432 9	0.076 5	0.050 61	1.328 39	0.994 67
	T1.5	0.490 2	0.072 2	0.075 76	1.326 66	0.998 06
	CK3	0.429 7	0.055 9	0.060 71	1.282 17	0.999 11
	T3	0.488 9	0.052 7	0.090 01	1.275 87	0.997 87
	CK5	0.426 3	0.071 3	0.068 39	1.354 28	0.997 30
	T5	0.491 7	0.063 8	0.088 88	1.310 43	0.996 81
2017	CK1.5	0.432 5	0.095 9	0.009 60	1.568 0	0.992 65
	T1.5	0.489 1	0.027 9	0.016 60	1.345 9	0.999 27
	CK3	0.432 7	0.097 1	0.008 98	1.603 8	0.995 88
	T3	0.495 3	0.025 8	0.017 50	1.339 1	0.997 81
	CK5	0.429 1	0.103 8	0.008 20	1.388 3	0.995 37
	T5	0.495 6	0.029 2	0.023 30	1.290 6	0.997 93

2.2.2 不同坡度施加生物炭对土壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线如图 3 所示,在低吸力段($h < 500\text{ cm}$)时,曲线坡度陡峭而密集;当吸力高于 500 cm 时,曲线变得平缓稀疏。这是由于在低吸力段,土壤排水主要是在大孔隙中进行,尽管吸力变化不大,但足够引起大孔隙土壤内含水率发生明显变化,故 SWCC 呈“陡直”状;当吸力在 500~9 000 cm 时,土壤中只有较小的孔隙能保留水分,土壤对水分的吸持力较大,土壤含水率随吸力的变化不明显,故在此吸力范围内 SWCC 呈“平缓”状。两年中 T1.5、T3、T5 的 SWCC 均位于 CK1.5、CK3、CK5 曲线上方,且坡度越大二者距离越远,这是因为生物炭增加

了土壤孔隙度,已有研究^[18]表明,施加 75 kg/hm² 生物炭主要增加土壤的中、小孔隙相对比例,土壤中、小孔隙的水分不易流出,使有效水含量增加,进而增强土壤持水性,故施加生物炭的 SWCC 位于对照曲线上方,且地形坡度最大的土壤其 θ_r 减小幅度最大,有效水含量增加最多,土壤持水性最优,由于 θ_r 变幅与地形坡度呈正相关关系,土壤持水性与地形坡度亦呈正相关关系,故是否施加生物炭二者 SWCC 间距与地形坡度呈正相关关系。

表 4 为不同坡度坡耕地施加生物炭处理较对照处理土壤体积含水率随吸力的变化,2016 年施用生物炭土壤含水率的总变化量在 1.5°、3°、5° 坡度分别增加 0.282 2、0.292 5、0.404 0 cm³/cm³,总变化率为

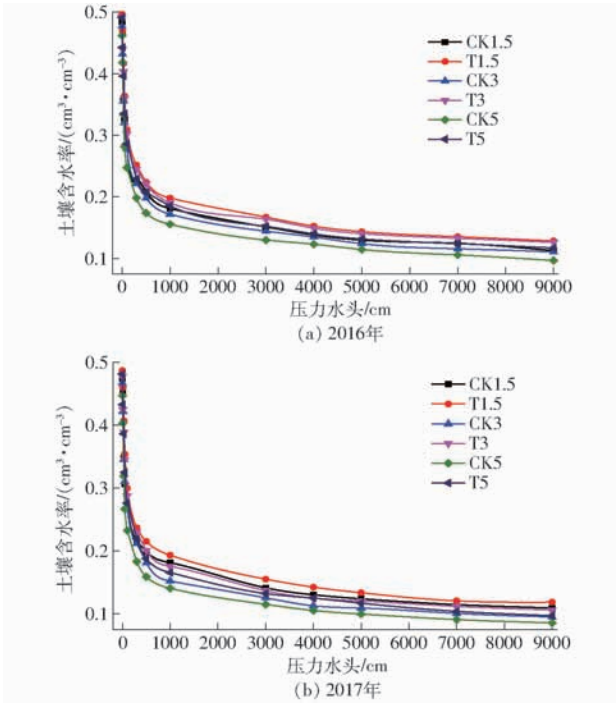


图3 施用生物炭不同坡度的土壤水分特征曲线
Fig.3 Soil water characteristic curves of different slopes with application of biological carbon

8.16%、8.69%、14.21%；2017年1.5°、3°、5°坡度的土壤含水率总变化量各增大0.2687、0.2819、0.3975 cm³/cm³，总变化率为7.77%、8.37%、13.98%。2017年较2016年相比施用生物炭后土壤体积含水率总增加量略有减少，土壤持水性能改善略弱，并且随地形坡度增大总变化率幅度也略有减少，说明施用生物炭次年作用效果较施用当年有所减弱，但由于生物炭降解较慢，对土壤持水性能仍有增加的作用。

2.2.3 生物炭对坡耕地土壤比水容量的影响

土壤比水容量是指单位基质势的变化引起的含水率变化，是衡量土壤水分对植物的有效性、反映土壤供水性能的一个重要指标，一般土壤水在吸力 $h=1\,000\text{ cm}$ 时的比水容量可以表征土壤的供水能力。各处理 $h=1\,000\text{ cm}$ 时土壤比水容量见表5，2016、2017年T1.5、T3、T5的比水容量均较CK1.5、CK3、CK5有所增加，2016年1.5°、3°、5°坡度各自增加了 1.16044×10^{-3} 、 1.282537×10^{-3} 、 $1.830207\times10^{-3}\text{ cm}^3/\text{cm}^4$ ，2017年分别增加 1.2152×10^{-5} 、 2.0001×10^{-5} 、 $4.9\times10^{-5}\text{ cm}^3/\text{cm}^4$ ，两年增长率均

表4 不同坡度坡耕地施加生物炭处理较对照处理土壤体积含水率随吸力的变化

Tab.4 Changes of soil volumetric water content with suction in different slopes sloping farmland by biological carbon treatment

年份	压力水头 h/cm	增加量/ $(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$			增加率/%		
		1.5°	3°	5°	1.5°	3°	5°
2016	0	0.010 2	0.016 1	0.032 6	2.11	3.37	7.06
	10	0.007 1	0.010 7	0.024 1	1.53	2.48	5.76
	30	0.016 5	0.014 3	0.021 7	4.61	4.02	6.49
	50	0.039 3	0.043 3	0.053 7	12.03	13.52	19.06
	100	0.026 7	0.025 2	0.039 2	9.46	9.06	15.83
	300	0.029 6	0.023 7	0.032 7	13.07	10.69	16.50
	500	0.018 6	0.023 4	0.034 3	8.93	11.81	19.71
	1 000	0.018 5	0.019 1	0.030 9	10.20	11.09	19.85
	3 000	0.016 4	0.019 8	0.021 2	10.83	13.70	16.30
	4 000	0.015 3	0.015 0	0.017 3	11.06	11.79	14.03
	5 000	0.014 8	0.015 7	0.017 5	11.39	12.65	15.26
2017	7 000	0.013 8	0.017 3	0.018 9	11.07	14.94	17.85
	9 000	0.055 4	0.048 0	0.059 9	19.11	13.32	21.94
	总体变化量	0.282 2	0.292 5	0.404 0	8.16	8.69	14.21
	0	0.012 0	0.015 2	0.029 6	2.60	3.19	6.41
	10	0.005 1	0.008 1	0.024 7	1.10	1.88	5.91
	30	0.015 8	0.015 4	0.020 5	14.01	13.56	18.52
	50	0.037 2	0.039 8	0.053 2	11.39	12.43	18.88
	100	0.027 2	0.024 2	0.038 5	9.64	8.70	15.55
	300	0.025 4	0.023 1	0.031 3	11.21	10.42	15.79
	500	0.015 7	0.022 7	0.033 7	7.53	11.46	19.37
	1 000	0.017 1	0.018 3	0.030 0	9.43	10.63	19.27
	3 000	0.015 9	0.019 4	0.022 2	10.50	13.43	17.06
	4 000	0.014 2	0.014 2	0.016 7	10.27	10.53	13.54
	5 000	0.013 7	0.016 3	0.017 0	10.55	13.13	14.82
	7 000	0.010 8	0.017 0	0.018 2	8.66	13.90	17.19
	9 000	0.058 6	0.048 2	0.061 9	16.36	14.68	21.20
	总体变化量	0.268 7	0.281 9	0.397 5	7.77	8.37	13.98

随着坡度的增加而增大,表明生物炭可使土壤比水容量增加,且比水容量变幅随地形坡度增加而增大。5°小区比水容量增长率最大与生物炭对其田间持水率和残余含水率变幅最大有关,坡度最大其田间持水率增幅最大,残余含水率减幅最大,使其土壤有效含水量增加最大,供给作物的水分增加量也就最多,进而供水能力增强最明显,比水容量增长率最大。2017 年比水容量较 2016 年小,说明施用生物炭次年与当年相比供水能力的增加程度会减弱。

表 5 不同坡度土壤吸力 1 000 cm 时的比水容量

Tab.5 Water capacity of soil with different slopes

under suction of 1 000 cm cm³/cm⁴

处理	2016 年	2017 年
CK1.5	2.862 70 × 10 ⁻⁴	1.155 81 × 10 ⁻⁴
T1.5	1.446 71 × 10 ⁻³	1.277 33 × 10 ⁻⁴
CK3	2.624 83 × 10 ⁻⁴	1.039 98 × 10 ⁻⁴
T3	1.545 02 × 10 ⁻³	1.239 99 × 10 ⁻⁴
CK5	1.693 03 × 10 ⁻⁴	8.001 60 × 10 ⁻⁵
T5	1.999 51 × 10 ⁻³	1.290 16 × 10 ⁻⁴

2.3 生物炭对坡耕地土壤非饱和和导水率的影响

土壤非饱和和导水率代表土壤水分在水头压力差作用下流动的性能,受土壤容重、含水率、孔隙分布特征等因素的共同影响^[19],当容重小、孔隙度大、有机质养分含量高时, $K(h)$ 往往相对较大。由图 4 可知,当土壤含水率小于 0.30 cm³/cm³时,随着土壤含水率的增加非饱和和导水率增加缓慢,增幅并不明显;当土壤含水率大于 0.30 cm³/cm³时,非饱和和导水率随 θ 的增加迅速增大。施用生物炭当年与次年 T1.5、T3、T5 的 $K(h)$ 曲线均位于 CK1.5、CK3、CK5 上方,且随地形坡度增大 $K(h)$ 曲线略向左上方移动。施加生物炭使非饱和和导水率增大主要是由于生物炭使土壤容重降低,孔隙度增大,增加了土壤对养分的吸附和有机质含量,进而使非饱和和导水率增加,说明生物炭可以提高土壤在非饱和状态下的导水能力,但坡度对土壤非饱和和导水率的影响并不十分明显。

施加生物炭当年和次年 T1.5、T3、T5 的 $K(h)$ 值较 CK1.5、CK3、CK5 均明显增大,2016 年 1.5°、3°、5°坡度分别增加 172.72%、239.61%、214.27%,2017 年 1.5°、3°、5°坡度分别增加 143.03%、161.9%、164.04%。坡度相同时,2017 年较 2016 年 $K(h)$ 值均有所减小,且 2017 年较 2016 年施加生物炭后 $K(h)$ 增量也减小。与 SWCC 相同,施加生物炭次年对土壤持水性、导水性仍有效但效果有所减弱,故施用生物炭 $K(h)$ 依然增加但增加幅度减小,但坡度对土壤非饱和和导水率的影响并无明显规律。

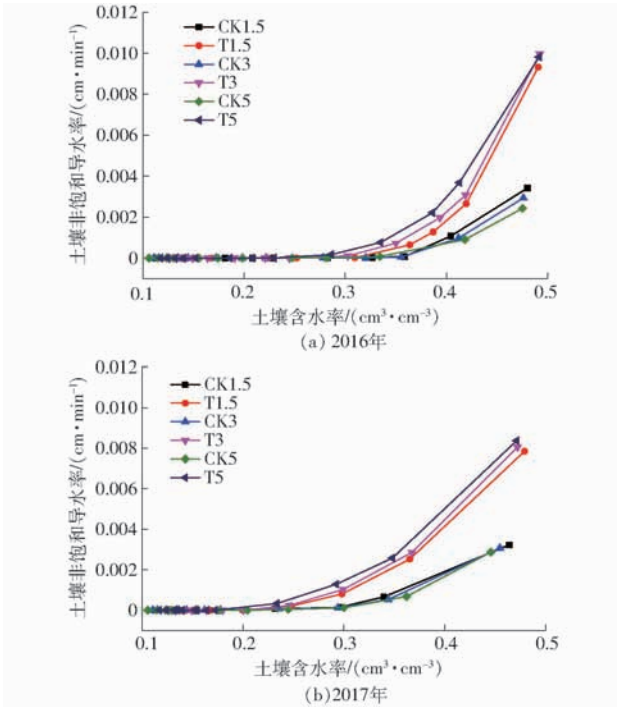


图 4 施用生物炭不同坡度的非饱和和导水率
Fig.4 Unsaturated water conductivity of soil on different slopes with application of biological carbon

2.4 生物炭对坡耕地土壤非饱和和水分扩散率的影响

土壤非饱和和水分扩散率 $D(\theta)$ 不仅反映出土壤孔隙状况、孔隙分布以及导水性能,同时对土壤水分运动状况也有一定影响^[20]。土壤水分扩散率受土壤质地、土壤密度、孔隙度、有机质含量和地面坡度等诸多因素的影响^[21],在相同介质、不同环境下表现为不相同性。由水平土柱试验所得数据计算得出 Boltzmann 的变换参数 ξ ,采用式 (8) 计算各处理 2016、2017 年的土壤非饱和和水分扩散率,如图 5 所示,各处理 $D(\theta)$ 随着 θ 的增大迅速增大。采用经验公式 $D(\theta) = ae^{b\theta}$ 拟合 2016、2017 年土壤非饱和和水分扩散率与土壤含水率的关系,拟合结果如表 6 所示。各处理 R^2 均大于 0.96,拟合效果极为理想,表明土壤非饱和和水分扩散率与土壤含水率符合经验公式呈显著的指数型曲线变化。

当 θ 小于等于 0.42 cm³/cm³ 时,T1.5、T3、T5 的 $D(\theta)$ 曲线均位于 CK1.5、CK3、CK5 曲线下方,说明生物炭此时抑制了土壤水分扩散;当 θ 大于 0.42 cm³/cm³ 时,T1.5、T3、T5 的 $D(\theta)$ 数值迅速增大,曲线向上越过 CK1.5、CK3、CK5 曲线,说明该阶段生物炭的存在使土壤水分水平扩散能力有所提高,在降雨时促进水分移动,提高降雨时土壤入渗速率,对夏季多发暴雨的黑土区尤为重要。同时随地形坡度增大生物炭的作用效果增大,由于坡度增加水土流失严重,导致土壤有机质大量流失,生物炭可起到滞留剂作用,且坡度大滞留有机质多,故 $D(\theta)$

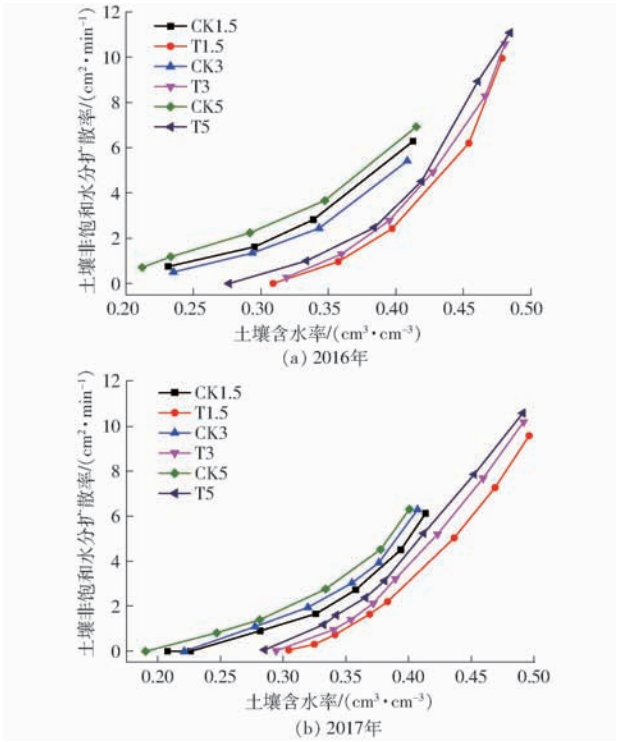


图5 施用生物炭不同坡度的土壤非饱和和水分扩散率
Fig.5 Water diffusion rate of unsaturated soil on different slopes with application of biochar

增加也就越多。根据径流小区实际情况 θ 多处于 $0.20 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内,即生物炭抑制土壤水分的水平运动,使更多水分留于土壤中进而促进了作物生长发育。2016 年 T1.5、T3、T5 的 $D(\theta)$ 增加幅度相对 2017 年更大一些,即施用生物炭次年对土壤水分扩散率的影响比施用生物炭当年弱化一些。

表 6 土壤非饱和和水分扩散率与土壤含水率的拟合
方程参数

Tab.6 Fitting equation parameters of water diffusion rate and soil water content				
年份	处理	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
2016	CK1.5	2.16	78.652 1	0.984 6
	T1.5	3.35	56.798 5	0.986 1
	CK3	1.63	44.154 6	0.989 7
	T3	1.02	68.871 5	0.984 1
	CK5	1.54	36.486 2	0.986 4
	T5	0.95	52.464 1	0.988 2
2017	CK1.5	1.35	67.923 8	0.996 3
	T1.5	3.25	35.147 8	0.967 0
	CK3	1.18	54.332 7	0.998 4
	T3	1.44	43.214 6	0.995 4
	CK5	0.66	63.439 9	0.989 9
	T5	0.28	47.395 9	0.998 5

3 讨论

土壤水分特征曲线、土壤非饱和和导水率、土壤非饱和和水分扩散率以及比水容量等是土壤水分运动基

本方程中的重要参数,反映了土壤孔隙状况、导水能力、持水性能及供水能力,受到土壤质地、结构、坡度等多重因素的共同影响。本研究在东北黑土区坡耕地开展了施加适量生物炭的对比试验,研究了坡度和施用生物炭当年、次年对上述土壤水动力学参数的影响。

施加生物炭后的两年内饱和含水率和田间持水率均增大,这与生物炭自身特性密不可分,施加生物炭改良土壤性质,使土壤含水率增加,持水能力加强,与已有研究^[22-24]结果一致;并且坡度越大,效果越显著,原因是坡度越大水土流失越严重,施用生物炭后提高了土壤持水能力,进而吸附更多流失的水分。由 2016、2017 年饱和含水率和田间持水率关于坡度和是否施用生物炭的回归方程可知:是否施用生物炭对饱和含水率和田间持水率的影响均较坡度因子显著。施用生物炭次年的 2017 年饱和含水率和田间持水率都比 2016 当年增加量少,这是由于施用生物炭后年限越长生物炭产生效果越弱。

施用生物炭后两年内对 SWCC 参数均有影响,生物炭对参数 θ_s 和 α 有增大的作用,对参数 θ_r 和 n 有减小的作用,与王丹丹等^[26]研究结果吻合,且参数 θ_s 、 θ_r 和 n 的变幅与地形坡度呈正相关关系,参数 α 的变幅与地形坡度呈负相关关系。两年内 T1.5、T3、T5 的 SWCC 均位于对照组上方,土壤持水能力增强^[27],随坡度增大两曲线距离越大,且均是 T5 曲线与 CK5 曲线距离最大,土壤有效水含量的变化是导致这一现象的主要原因;但 2017 年各曲线间间距与 2016 年相比略小,这与生物炭降解缓慢有关。

作物以相同的能量吸水,在不同基质势下从各种土壤中所吸收的水量因比水容量不同而形成很大的差别,比水容量越高,土壤供水能力越强,持水量越大,土壤有效水含量越高,作物吸水量也就越大,在本研究中施用生物炭当年和次年都使比水容量增大,对土壤水分调控、作物生长均有可观效果,同田丹等^[9]对生物炭研究结果一致。

本研究中,施加生物炭当年和次年 T1.5、T3、T5 小区的 $K(h)$ 较 CK1.5、CK3、CK5 均增大,即土壤在非饱和状态下的导水能力提高,刘志凯^[10]、王睿垠等^[28]得到过相似结论,但 $K(h)$ 与坡度变化关系不明显。生物炭增大 $K(h)$ 的原因:土壤水分总向土水势降低的方向移动,水分在吸力的作用下从较小的孔隙流向大孔隙进而流走,施加生物炭的土壤孔隙度较大,水分移动更为容易,与已有结论一致^[29]。且施加生物炭次年较当年 $K(h)$ 增加量减小,仍与施用年限和生物炭微降解相关。

由施加生物炭当年与次年对不同坡度土壤水分扩散率的影响可知,当 $\theta \leq 0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,施加生

物炭抑制土壤水分扩散;当 $\theta > 0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,添加生物炭促进土壤水分扩散,东北黑土区土壤含水率多集中在 $0.20 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内,即生物炭抑制本地区土壤水分扩散,已有研究得到类似结论^[9],且与潘英华等^[30]研究结果一致。坡度对土壤非饱和水分扩散率也有影响,在东北黑土区生物炭对土壤水分扩散的抑制程度随地形坡度增大而变大,坡度变大土壤中可移动水量增多,故施加生物炭后对水分流失控制更大,更加有利于作物生长发育,且 $D(\theta)-\theta$ 曲线符合指数模型, R^2 均大于 0.96,拟合效果较为理想。施用生物炭次年土壤水分扩散率抑制效果比施用生物炭当年略差,可能是生物炭施用次年效果减弱的原因。

本文仅分析了施加生物炭后两年内的情况,对于施加生物炭多年后的效应有待增加试验年限进一步探究。

4 结论

(1)施用生物炭当年与次年均可增大土壤的田间持水率和饱和含水率,并且地形坡度越大效果越显著,其中施用生物炭次年较当年田间持水率和饱

和含水率均略有减小。施用生物炭对饱和含水率和田间持水率的影响均较坡度因子更为显著。

(2)施用生物炭当年与次年对 SWCC 参数和土壤水吸力在 1 000 cm 时的比水容量均有影响,生物炭可增大参数 θ_s 、 α 和比水容量,减小参数 θ_r 和 n ,且参数 θ_s 、 θ_r 、 n 及比水容量的变幅与坡度呈正相关关系,参数 α 的变幅与坡度呈负相关关系。在各个土壤吸力条件下,施用生物炭当年和次年均使土壤含水率增加、土壤持水性增强,生物炭施用次年效果较施用当年减弱。

(3)坡度对 $K(h)$ 影响无明显规律性,但施加生物炭可使 $K(h)$ 增大,使非饱和土壤的导水性增强,并且施加生物炭当年的效果较次年更为显著,2016 年 $K(h)$ 增长率以 3° 坡度施加适量生物炭的处理最高,为 239.61%,2017 年 $K(h)$ 增长率以 5° 坡度施加适量生物炭的处理最高,为 164.04%。

(4)对于土壤含水率多集中在 $0.20 \sim 0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内的黑土区土壤,施加生物炭可降低 $D(\theta)$,抑制土壤水分的水平运动,随地形坡度增加抑制效果增强,并且施用生物炭次年较施用当年对土壤水分扩散率的影响小。

参 考 文 献

- [1] 张忠河,林振衡,付娅琦,等.生物炭在农业上的应用[J].安徽农业科学,2010,38(22):11880-11882.
ZHANG Zhonghe, LIN Zhenheng, FU Yaqi, et al. Application of biochar in agriculture[J]. Anhui Agricultural Science, 2010, 38(22): 11880-11882. (in Chinese)
- [2] OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(4): 591-596.
- [3] ASAI H, SAMSON B K, STEPHAN H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos [J]. Field Crops Research, 2009, 111(1): 81-84.
- [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] AMYMARIE A D, GSCHWEND P M. Assessing the combined roles of natural organic matter and black carbon as sorbents in sediments in sediments[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(1): 21-29.
- [6] GIASER B, BALASHOV E, HAUMAIER L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7): 669-678.
- [7] OGAWA M, OKIMORI Y, TAKAHASHI F. Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: three case studies[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006, 11(2): 429-444.
- [8] YU X Y, YING G G, KOOKANA R S. Sorption and desorption behaviors of diuron in soils amended with charcoal[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(22): 8545-8550.
- [9] 田丹,屈忠义,勾芒芒,等.生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析[J].土壤通报,2013,44(6):1374-1378.
TIAN Dan, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Influence and mechanism analysis of biochar on water diffusivity of different soil textures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1374-1378. (in Chinese)
- [10] 刘志凯.生物炭不同用量与施用年限对土壤水分运动及溶质运移的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2017.
LIU Zhikai. Effects of different dosage and age of biochar on soil water movement and solute transport[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [11] 刘世杰,窦森.黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):79-82.
LIU Shijie, DOU Sen. Effects of black carbon on maize growth and soil nutrient uptake and leaching loss[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 79-82. (in Chinese)
- [12] 魏永霞,张翼鹏,张雨凤,等.黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J/OL].农业机械学报,2018, 49(2):284-291,312.
WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of two consecutive years supply of biochar on soil

- improvement, water saving and yield increasing in sloping farmland of black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 284–291, 312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036. (in Chinese)
- [13] 赵会明. 东北黑土区水土流失现状、成因及防治措施[J]. 水利科技与经济, 2008(6): 477–478.
ZHAO Huiming. Current situation, causes and prevention measures of soil and water loss in black soil area of northeast China[J]. Water Conservancy Technology and Economy, 2008(6): 477–478. (in Chinese)
- [14] 魏永霞, 张忠学, 赵雨森. 坡耕地水土保持理论与技术研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 1–6.
- [15] 仵峰, 张凯, 宰松梅, 等. 小麦玉米秸秆还田量对土壤水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 101–105.
WU Feng, ZHANG Kai, ZAI Songmei, et al. Effect of soil return on soil water movement characteristics of wheat-corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 101–105. (in Chinese)
- [16] 魏永霞, 冯鼎锐, 刘志凯, 等. 生物炭对黑土区坡耕地水土保持及大豆增产效应研究[J]. 节水灌溉, 2017(5): 37–41.
WEI Yongxia, FENG Dingrui, LIU Zhikai, et al. Effects of biochar on soil and water conservation and soybean yield in sloping farmland of black soil area[J]. Water Saving Irrigation, 2017(5): 37–41. (in Chinese)
- [17] 李光录, 赵晓光. 水土流失对土壤物理性质的影响[J]. 西北林学院学报, 1995(8): 22–27.
LI Guanglu, ZHAO Xiaoguang. Effects of soil erosion on physical properties of soils[J]. Journal of Northwestern Forestry College, 1995(8): 22–27. (in Chinese)
- [18] 王艳阳. 黑土区施用生物炭条件下的土壤水分运动与溶质运移模拟[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
WANG Yanyang. Simulation of soil water movement and solute transport under the condition of applying biochar in black soil area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [19] 刘丽芳, 许新宜, 王会肖, 等. 土壤水资源评价研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5): 621–625.
LIU Lifang, XU Xinyi, WANG Huixiao, et al. Progress in evaluation of soil water resources[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2009, 45(5): 621–625. (in Chinese)
- [20] 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: 4–22, 168–170.
- [21] 易军, 尚三林, 杨正礼, 等. 宁夏黄灌区灌淤土水力参数研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 46–50.
YI Jun, SHANG Sanlin, YANG Zhengli, et al. Study on hydraulic parameters of irrigation and silting soil in yellow irrigation area of Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(2): 46–50. (in Chinese)
- [22] 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.
HE Xushen, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. The significance of biochar production and agriculture and its domestic and international dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 1–7. (in Chinese)
- [23] HARDIE M, CLOTHIER B, BOUND S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? [J]. Plant and Soil, 2014, 376(1–2): 347–361.
- [24] 田丹, 屈忠义, 李波, 等. 生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 135–137.
TIAN Dan, QU Zhongyi, LI Bo, et al. Experimental study on the influence of biochar on hydraulic characteristic parameters and water holding characteristics of sandy soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 135–137. (in Chinese)
- [25] 魏永霞, 刘志凯, 冯鼎锐, 等. 生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 201–207.
WEI Yongxia, LIU Zhikai, FENG Dingrui, et al. Influences of the biochar on physical properties of the meadow black soil and dynamic changes of soil water after the individual rainfall[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 201–207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160825&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.025. (in Chinese)
- [26] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永毫, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 101–104, 109.
WANG Dandan, ZHENG Jiyong, YAN Yonghao, et al. Study on the influence of biochar on soil water-holding performance in Southern Ningxia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 101–104, 109. (in Chinese)
- [27] 张强, 孙向阳, 黄利江, 等. 毛乌素沙地土壤水分特征曲线和入渗性能的研究[J]. 林业科学研究, 2004(增刊1): 9–14.
ZHANG Qiang, SUN Xiangyang, HUANG Lijiang, et al. Study on soil water characteristic curve and infiltration performance of Maowusu sandy land[J]. Forestry Science Research, 2004(Supp.1): 9–14. (in Chinese)
- [28] 王睿垠, 魏永霞, 刘慧, 等. 生物炭对东北草甸黑土水分运动参数的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 186–194.
WANG Ruiyin, WEI Yongxia, LIU Hui, et al. Influences of biochar on hydrodynamic parameters of meadow black soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018 49(7): 186–194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180723&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.023. (in Chinese)
- [29] LIU Z, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties[J]. Plos One, 2017, 12(6): e0179079.
- [30] 潘英华, 雷廷武, 张晴雯, 等. 土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(增刊4): 37–39.
PAN Yinghua, LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, et al. Effects of soil structural improvers on soil hydrodynamic parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(Supp.4): 37–39. (in Chinese)