

黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应

魏永霞<sup>1,2</sup> 张翼鹏<sup>1</sup> 张雨凤<sup>1</sup> 王睿垠<sup>1</sup> 马瑛瑛<sup>1</sup> 张 奕<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 东北黑土区土壤肥沃、性状优良、适宜作物生长,然而大面积坡耕地的水土流失问题严重威胁着区域生态环境和国家粮食安全。为探明施加生物炭对该区域坡耕地的节水增产效应,以及最优施加量与施加年限,基于田间径流小区进行为期两年的观测试验。2015 年,试验根据生物炭施加量设置为 C0(0 t/hm<sup>2</sup>)、C25(25 t/hm<sup>2</sup>)、C50(50 t/hm<sup>2</sup>)、C75(75 t/hm<sup>2</sup>)和 C100(100 t/hm<sup>2</sup>)5 个处理;2016 年,各处理分别连续施加等量生物炭。试验结果表明:施加两年生物炭均降低了土壤容重、提高了孔隙度和有机碳密度,且随施加量的增加效果越显著;2015 年实测田间持水量随生物炭施加量呈上升的趋势,2016 年则呈先升后降的趋势,上升至 C50 处理达到最佳;2016 年 C50 处理土壤三相比较合理,广义土壤结构指数(GSSI)高于其他处理;连续两年施加生物炭均减少了 3°坡耕地的年径流量,各年份年径流系数降低最多的分别为 C75(15.44%)和 C50(17.27%)处理。适量生物炭也可增加单次降雨后雨水蓄积量和其随时间下降的速率和幅度;2015 年和 2016 年大豆产量最高的处理分别是 C75 和 C50,增产率分别为 27.16%和 28.17%。比较 2015 年和 2016 年试验结果,连续两年施加 50 t/hm<sup>2</sup>生物炭时,大豆水分利用效率较对照处理增幅最高,为 27.67%,节水增产效果最佳。

**关键词:** 生物炭; 土壤三相比; 径流系数; 雨水蓄积量; 大豆水分利用效率

**中图分类号:** S157.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0284-08

Influences of Two Consecutive Years Supply of Biochar on Soil Improvement, Water Saving and Yield Increasing in Sloping Farmland of Black Soil Region

WEI Yongxia<sup>1,2</sup> ZHANG Yipeng<sup>1</sup> ZHANG Yufeng<sup>1</sup> WANG Ruiyin<sup>1</sup> MA Yingying<sup>1</sup> ZHANG Yi<sup>1</sup>

(1. College 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, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The black soil region in Northeast China is rich in soil fertility, good in soil properties, and suitable for crop growth. However, the problem of soil erosion in sloping farmland seriously threatened the regional ecological environment and national food security. To discover the influences of the optimal amount and duration of biochar supply on water saving and yield increasing in slopping farmland of the region, the two years experiments were conducted based on runoff plot in 2015 and 2016. Five treatments were set according to different amounts of biochar, which were 0 t/hm<sup>2</sup> (C0), 25 t/hm<sup>2</sup> (C25), 50 t/hm<sup>2</sup> (C50), 75 t/hm<sup>2</sup> (C75) and 100 t/hm<sup>2</sup> (C100), and the same amount of biochar for each treatment was supplied continuously in the next year. The results showed that biochar made the soil bulk density decreased, and the soil porosity and organic carbon density were increased sharply with the increase of biochar in two years. The field capacity was increased with the increase of biochar in 2015 while which was first increased and then decreased in 2016, and the best one was the treatment of C50. At the same time, the three-phase and generalized soil structure index (GSSI) were the most reasonable in C50 compared with others. The annual runoff in three degrees sloping farmland both were decreased in the two experiment years, and the annual runoff coefficient was decreased most, which was in the treatment of C75 (by 15.44%) in 2015 and C50 (by 17.27%) in 2016. The addition of biochar also could increase the soil water accumulation amount and decrease the rate and magnitude with time after rainfall. The highest yield of soybean was respectively C75 (27.16%) in 2015 and C50 (28.17%) in 2016. Compared the results in 2015 and 2016, the water use efficiency of soybean was increased by 27.67%

收稿日期: 2017-06-09    修回日期: 2017-08-30

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51479033)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400101)和黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z17017)

**作者简介:** 魏永霞(1964—),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

with 50 t/hm<sup>2</sup> biochar supply for two years compared with the control treatment, and the effect of water saving and yield increasing of the treatment was the best one.

**Key words:** biochar; soil three-phase ratio; runoff coefficient; rainwater accumulation; water use efficiency of soybean

0 引言

东北黑土区为全球宝贵的三大黑土区之一,作为我国主要粮食生产基地,为保障国家粮食安全做出了巨大贡献。该区土壤以黑土、黑钙土及草甸黑土为主<sup>[1]</sup>。“典型黑土”是一种结构好、肥力高、性状佳的高产土壤,特别适宜玉米、大豆等粮食作物生长。由于当地耕地地形多为丘陵漫岗,历时短、强度高且集中的降雨特点,不科学的耕作方式,导致黑土区坡耕地水土流失严重,黑土层厚度逐渐变薄<sup>[2]</sup>,土地生产力下降。该地区每年产生大量的秸秆资源。预计到 2020 年,黑龙江省主要秸秆理论资源量将达到 6 500 万 t。然而,目前秸秆资源利用率较低,每年约有 21% 的秸秆资源被焚烧或废弃<sup>[3]</sup>,对大气环境构成威胁。因此,实行科学有效的坡耕地水土资源保护,低碳环保的同时提高作物水分利用效率,达到增产保收,对促进黑土区农业可持续发展具有重要意义。

生物炭是以作物秸秆、动物粪便为原材料的生物残质,在缺氧或完全断氧的情况下,经过高温(小于 700℃)热解制成的一类稳定难溶、高度芳香化结构的碳质材料<sup>[4-5]</sup>。作为一种新型环保的土壤改良剂,生物炭孔隙度高、比表面积大、表面具有大量负电荷<sup>[6-7]</sup>,施入土壤中可明显改善土壤结构,提高土壤 pH 值<sup>[4,8-10]</sup>,强化土壤的持水性能,促进雨水下渗<sup>[11-13]</sup>,吸附土壤养分并提高养分的有效性<sup>[14-18]</sup>,可为作物提供良好的生长环境,提高水肥利用效率,进而提高产量<sup>[19-20]</sup>。

由此可见,生物炭在农业上应用前景良好,如今已成为国内外学者研究的热点。施加生物炭在保水保土方面作用显著,SADEGHI 等<sup>[21]</sup>通过模拟试验得出,利用酒糟生物炭可明显减少地表径流量和土壤潜在侵蚀,亦有众多国外研究者得出相似结论<sup>[10,22]</sup>。目前国内此方面研究较少,且大多数以室内径流模拟或短期观测的形式为主。生物炭性质稳定,其对土壤的影响会长期存在,将其施入黑土区田间的实际效果,以及生物炭最优施加剂量与年际间连续施用的最优模式尚需明晰<sup>[23]</sup>。笔者通过两年田间试验,旨在探索黑土区坡耕地连续施加生物炭的土壤改良与节水增产效应,为黑土区农业水土资源可持续高效利用提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015、2016 年在位于东北典型黑土带的黑龙江省农垦北安管理局红星农场试验基地进行(北纬 48°02′~48°17′,东经 126°47′~127°15′),该区域为小兴安岭西麓向松嫩平原的过渡丘陵漫岗地区,地势由东向西倾斜,岗顶平缓,坡面较长,坡度为 3°~5°。耕层土壤主要为草甸黑土,表层松散,底土粘重,透水性差。该区属中温带湿润大陆性季风气候,大于等于 10℃ 的有效积温为 2 254.5℃,日照时数为 2 364.2 h,无霜期 105 d 左右;多年平均降雨量为 553 mm,且多集中在 7—9 月,期间多年平均降雨量为 401.7 mm,约占全年降雨量的 70%~80%。

1.2 试验材料

供试土壤为草甸黑土。供试生物炭为玉米秸秆生物炭,购自辽宁金和福农业开发有限公司,制备方式为玉米秸秆在无氧条件下 450℃ 高温裂解,粒径 1.5~2 mm。供试土壤与生物炭基本理化性质见表 1。供试作物为大豆,品种为黑河三号。

表 1 供试土壤与生物炭基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of tested soil and biochar

| 供试材料 | 总有机碳<br>质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全磷<br>质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全钾<br>质量比/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | pH 值 |
|------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------|
| 土壤   | 34.83                                 | 1.11                                | 0.45                                | 0.35                                | 6.30 |
| 生物炭  | 702.10                                | 13.97                               | 2.24                                | 34.55                               | 9.14 |

1.3 试验设计

试验在径流小区内进行,小区坡度选择黑土区坡耕地有代表性的 3°坡,规格 20 m×5 m,共计 10 个径流小区同向平行铺设(图 1)。各小区末端设径流自动记录系统,径流经记录及取样后流入小区底端的



图 1 径流小区实拍图

Fig.1 Real shot drawing of runoff plots

排水沟。为防止测渗,各小区边界用埋入地下 1 m 深的铁板隔开,每个小区间设置 1 m 间隔。试验按照生物炭施加量设置 5 个处理:C0(对照处理)、C25(25 t/hm<sup>2</sup>)、C50(50 t/hm<sup>2</sup>)、C75(75 t/hm<sup>2</sup>)、C100(100 t/hm<sup>2</sup>)。2016 年试验在上一年度的基础上各处理连续施加等量生物炭,每个处理 2 次重复。生物炭在作物种植前经人工翻耕充分混匀至 0~20 cm 耕层土壤中。

1.4 观测内容及处理方法

1.4.1 土壤理化性质

各年份全生育期末利用环刀收集耕层原状土,各处理 4 次重复(相同处理 2 座小区各取 2 次重复),土样实际含水率见表 2。根据室内测定威尔科克斯法测其田间持水量并借助 DIK-1130 型土壤三相仪测取其容重、孔隙度以及三相比,计算出广义土壤结构指数(GSSI),为

GSSI = [(Xg - 25)XyXq]^0.4769 (1)

式中 Xg——固相体积百分比,大于 25%

Xy——液相体积百分比

Xq——气相体积百分比

表 2 各处理土样实际含水率

| Tab.2 Actual soil moisture content of soil sample obtained by each treatment % |                    |                     |                    |                    |                     |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 年份                                                                             | C0                 | C25                 | C50                | C75                | C100                |
| 2015                                                                           | 21.17 <sup>a</sup> | 20.96 <sup>a</sup>  | 23.75 <sup>b</sup> | 24.51 <sup>b</sup> | 23.13 <sup>b</sup>  |
| 2016                                                                           | 20.38 <sup>a</sup> | 22.46 <sup>ab</sup> | 23.69 <sup>b</sup> | 23.07 <sup>b</sup> | 21.79 <sup>ab</sup> |

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

在土壤耕层取土(取样时间与重复次数同上),利用德国 Elementar Vario TOC 有机碳分析仪测定总有机碳(TOC)含量,并过 2 mm 筛测得大于 2 mm 砾石的质量分数,进而计算土壤有机碳密度

Soc = 0.1cpd(1 - θ) (2)

式中 Soc——土壤有机碳密度,t/hm<sup>2</sup>

c——实测耕层有机碳含量,g/kg

ρ——耕层土壤容重,g/cm<sup>3</sup>

d——土壤耕层厚度,取 20 cm

θ——土样中大于 2 mm 砾石所占的质量百分比, %

1.4.2 降雨、地表径流量

分别采用自记雨量计对作物全生育期各次降雨的降雨量、降雨强度和降雨历时进行观测,用设在各小区的径流自动记录系统对各次降雨的产流量进行测取。

1.4.3 单次降雨雨水蓄积量

选取 2015 年 8 月 19 日和 2016 年 8 月 18 日 2 次典型次降雨(降雨后 5 d 未出现降雨),利用时域

反射仪(TDR)对土壤 0~100 cm 深度土壤含水率分层进行测取。土壤深度分层为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm,土壤含水率测量时间包括降雨前和降雨后 8、16、24、36、48、72、96、120 h。雨水蓄积量计算公式为

ΔWi = Wi - W0 (3)

式中 ΔWi——雨水蓄积量,mm

Wi——t 时刻土壤储水量,mm

W0——雨前土壤储水量,mm

1.4.4 大豆产量及其构成要素

试验分别于 2015 年 10 月 8 日和 2016 年 10 月 7 日对大豆进行收获。在相同处理的 2 个径流小区的坡上和坡下相应位置选取 2 个 10 m<sup>2</sup>的地块,每个地块随机选 5 株豆秆测量单株荚数、单株粒数与百粒质量等,并对所选地块进行实收测产,计算大豆产量。

1.4.5 生育期耗水量 ET 与水分利用效率 WUE

运用实测数据分别得出生育期耗用量和水分利用效率,为

ET = P + I + ΔS - ΔR ± Q (4)

WUE = Y/ET (5)

式中 ET——作物生育期耗水量,mm

P——作物生育期内降水量,mm

I——作物生育期内灌水量,本试验作物生育期内未灌水,取 0 mm

ΔS——收获期与播种期 0~100 cm 土壤储水量之差,mm

ΔR——地表径流量,mm

Q——地下水交换量(试验区地下水埋深 40 m,可忽略不计),mm

WUE——水分利用效率,kg/(mm·hm<sup>2</sup>)

Y——作物产量,kg/hm<sup>2</sup>

1.5 数据处理方法

利用 Microsoft Excel 2010 对数据进行整理和图表的绘制,采用 SPSS 22.0 对数据进行描述性统计和单因素方差分析(One-way ANOVA),并进行多重比较,显著性水平为 0.05。对各年份大豆产量与生物炭施加量运用 Spearman 等级相关分析方法进行相关分析,显著性水平为 0.05。

2 观测结果与分析

2.1 施加生物炭对土壤理化性质的影响

如表 3 所示,2015 年施加生物炭有效降低了土壤容重,较对照处理降低 0.86%~6.03%。土壤孔隙度呈上升趋势,较 C0 处理增加 4.03%~12.90%;2016 年施加生物炭后土壤容重与孔隙度

变化趋势与上一年相同,容重最高降低 8.70%,孔隙度最高增加 23.40%,且影响差异均达到显著水平( $P < 0.05$ )。以上变化均取决于生物炭多孔性、

容重小且远远低于土壤容重的结构特征,施入土壤必然改变原土样的孔隙状况,即降低土壤容重和增加孔隙度。施入量越多,影响则越强烈。

表 3 各处理土壤的理化性质  
Tab.3 Physicochemical properties of treated soils

| 处理   | 容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) |                    | 总孔隙度/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) |                    | 实测田间持水量/%           |                     | 有机碳密度/(t·hm <sup>-2</sup> ) |                    |
|------|--------------------------|--------------------|-------------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|
|      | 2015                     | 2016               | 2015                                      | 2016               | 2015                | 2016                | 2015                        | 2016               |
| C0   | 1.16 <sup>a</sup>        | 1.15 <sup>a</sup>  | 49.6 <sup>a</sup>                         | 48.3 <sup>a</sup>  | 32.81 <sup>a</sup>  | 32.64 <sup>a</sup>  | 3.41 <sup>a</sup>           | 3.52 <sup>a</sup>  |
| C25  | 1.15 <sup>ab</sup>       | 1.12 <sup>b</sup>  | 51.6 <sup>a</sup>                         | 53.2 <sup>b</sup>  | 33.43 <sup>ab</sup> | 34.78 <sup>bc</sup> | 4.48 <sup>b</sup>           | 5.71 <sup>b</sup>  |
| C50  | 1.12 <sup>bc</sup>       | 1.07 <sup>c</sup>  | 52.8 <sup>ab</sup>                        | 55.7 <sup>bc</sup> | 34.26 <sup>bc</sup> | 36.20 <sup>c</sup>  | 5.52 <sup>c</sup>           | 6.72 <sup>b</sup>  |
| C75  | 1.12 <sup>bc</sup>       | 1.05 <sup>cd</sup> | 53.4 <sup>ab</sup>                        | 58.0 <sup>c</sup>  | 35.13 <sup>c</sup>  | 35.27 <sup>bc</sup> | 6.28 <sup>cd</sup>          | 8.45 <sup>c</sup>  |
| C100 | 1.09 <sup>c</sup>        | 1.05 <sup>cd</sup> | 56.0 <sup>b</sup>                         | 59.6 <sup>c</sup>  | 35.48 <sup>c</sup>  | 34.39 <sup>b</sup>  | 6.91 <sup>d</sup>           | 12.19 <sup>d</sup> |

2015 年各处理实测田间持水量随施加炭量的增加而逐渐提高,较 C0 提高 1.89%~8.14%;2016 年连续施加后,提高土壤田间持水量至 C50 处理表现最优,较 C0 提高 10.91%,之后出现下降趋势。此外,2016 年试验 C50 处理累积加炭量为 100 t/hm<sup>2</sup>,较 2015 年相同生物炭施加量的 C100 处理土壤持水能力的提升表现更佳。生物炭特有的物理特性可极大地降低土壤容重,再加上其表面巨大的比表面积以及亲水基团,进一步提高了土壤持水能力。然而有研究<sup>[24]</sup>认为,生物炭中有机物多含疏水性基团,施加量过高会增加斥水性,这可能是高炭量处理持水效果减弱的原因之一。

土壤有机碳是较活跃的土壤组分,决定土壤肥

力和作物产量<sup>[25]</sup>,维持着农田生态系统的可持续发展<sup>[26]</sup>。有机碳密度是指一定土层厚度中所含有机碳的质量。通过两年的试验(表 3),施用生物炭后各年份产生的规律一致,即土壤有机碳含量与生物炭施加量之间呈显著正相关( $P < 0.05$ ),2015 与 2016 年施用生物炭后土壤有机碳密度较当年 C0 处理提高幅度分别 31.4%~102.6%、62.2%~246.3%。

2.2 施加生物炭对土壤三相比的影响

2015、2016 年各处理土壤三相比见图 2,表 4 显示的是各处理的广义土壤结构指数 GSSI,GSSI 值越接近 100,土壤结构越接近理想状态。资料显示<sup>[27]</sup>,最适合作物生长的理想土壤三相比为 50:25:25。

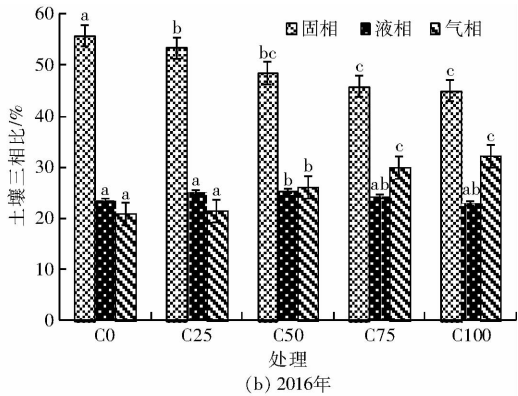
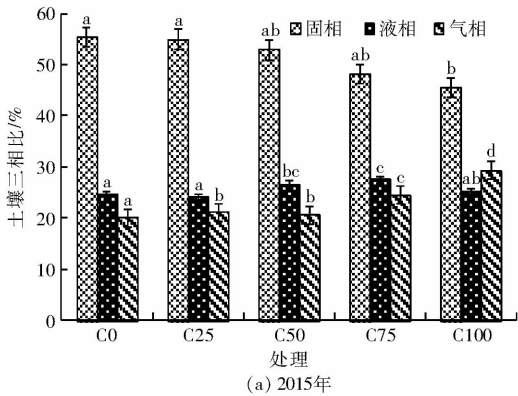


图 2 2015、2016 年试验各处理土壤三相比

Fig.2 Soil three-phase ratio tested in 2015 and 2016

表 4 各处理的广义土壤结构指数

Tab.4 Generalized soil structure index

| 年份   | C0                 | C25                 | C50                 | C75                 | C100                |
|------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 2015 | 94.12 <sup>a</sup> | 94.97 <sup>ab</sup> | 97.25 <sup>bc</sup> | 96.84 <sup>bc</sup> | 96.40 <sup>bc</sup> |
| 2016 | 93.85 <sup>a</sup> | 96.69 <sup>b</sup>  | 98.31 <sup>cd</sup> | 93.58 <sup>a</sup>  | 93.30 <sup>a</sup>  |

由图 2a 可看出,2015 年施加生物炭对土壤含水率与土壤容重产生影响,土壤三相比发生变化。固相率呈下降趋势,液相与气相率分别上升了 6.34%~40.91%、8.01%~25.88%。与其他处理相比,GSSI

最高的是 C50 处理(表 4),最接近理想状态。此外,C75 和 C100 处理的土壤结构改善效果也均达到显著水平( $P < 0.05$ )。

由图 2b 中可看出,2016 年各处理土壤固相率仍保持降低的趋势,累积施炭量较高的 C75 和 C100 处理固相率下降程度过大,远离土壤固相率最佳状态 50%,同时液相率也出现降低,两处理 GSSI 与 C0 未表现出显著差异,甚至低于 C0 处理。该年份土壤三相比最为合理的同样是 C50 处理,GSSI 较 C0

处理提高了 4.75%,差异显著( $P < 0.05$ )。由此可见,适量生物炭可提高土壤含水率与通透性,过量反而会导致土壤结构松散变差。

综合两年试验结果可以发现,施加秸秆生物炭 50 t/hm<sup>2</sup>,施加年限为 2a 时,对草甸黑土结构改善程度相对较好,该处理 GSSI 值为 98.31,高于其他处理。

2.3 施加生物炭对年径流量的影响

2015 年和 2016 年各处理年径流深  $R$  以及径流系数  $\alpha$  见表 5。

表 5 各年份以及各处理的年径流深  $R$  和径流系数  $\alpha$   
Tab.5 Annual runoff  $R$  and runoff coefficient  $\alpha$  in each year

| 处理   | $R/\text{mm}$ |       | $\alpha/\%$ |       |
|------|---------------|-------|-------------|-------|
|      | 2015          | 2016  | 2015        | 2016  |
| C0   | 82.59         | 94.48 | 24.99       | 20.56 |
| C25  | 76.84         | 79.56 | 23.25       | 17.31 |
| C50  | 72.64         | 78.16 | 21.98       | 17.01 |
| C75  | 69.84         | 80.10 | 21.13       | 17.43 |
| C100 | 70.51         | 81.69 | 21.33       | 17.78 |

施加秸秆生物炭有效地减少了 3°坡耕地的年径流量,2015 年减流效果最优的为 C75 处理,年径流量相比 C0 减少 15.44%, $\alpha$  由高到低为 C0、C25、C50、C100、C75;2016 年  $\alpha$  由高到低为 C0、C100、C75、C25、C50,这一年中生物炭施加量为 50 t/hm<sup>2</sup> 径流控制效果最为显著,较对照处理年径流量降低 17.27%。对比两年试验结果来看,2016 年 C50 处理抑制径流效果同样优于 2015 年同炭量的 C100 处理,减流率增加 2.6 个百分点。即便是生物炭的多

年累积施加量相同,但施加量在年度上的分配不同,其径流控制效果也不相同。为达到坡耕地节水保土最优效果,应注重生物炭施用量在年际间的合理分配。

2.4 施加生物炭对单次降雨后雨水蓄积量的影响

选取 2015 年 8 月 19 日和 2016 年 8 月 18 日两次典型降雨,两次降雨后 5 d 内(未降雨)对各处理土层深度 0~100 cm 的土壤雨水蓄积量以及随时间的变化情况进行观测。观测从雨后 8 h 开始,时间间隔为 8、12、24 h。

由于水分的蒸腾与植物的耗水持续进行,降雨后各处理土壤的雨水蓄积量均随时间的推移逐渐减少,甚至达到负值。2015 年 8 月 19 日降雨历时 145 min,降雨量 35.5 mm,平均降雨强度 12.92 mm/h。如图 3a 所示,降雨后 24~72 h 各处理雨水蓄积量下降幅度均有所增加,C0 和 C25 处理下降幅度较大。72 h 之后,施加生物炭量 50 t/hm<sup>2</sup> 以上的处理下降速率有所减缓,进入缓慢下降期。从雨水蓄积量高低来看,各处理均在雨后即达到最大值,施加生物炭明显增加了 0~100 cm 土层深度的雨水蓄积量,较对照处理提高 16.86%~55.21%。

2016 年 8 月 18 日降雨历时 107 min,降雨量 48.4 mm,平均雨强为 23.80 mm/h。如图 3b 所示,雨水蓄积量整体变化趋势与上一年相似。C25 与 C50 处理的雨水蓄积量较高,且对雨水蓄积量下降速率的减缓效果表现较好。原因可能是生物炭可增加土壤孔隙度与非饱和导水率,促进雨水下渗至土层中,使得土壤含水率大幅度增加,此外,生物炭对水分的吸持作用降低了雨水蓄积量下降的速率。

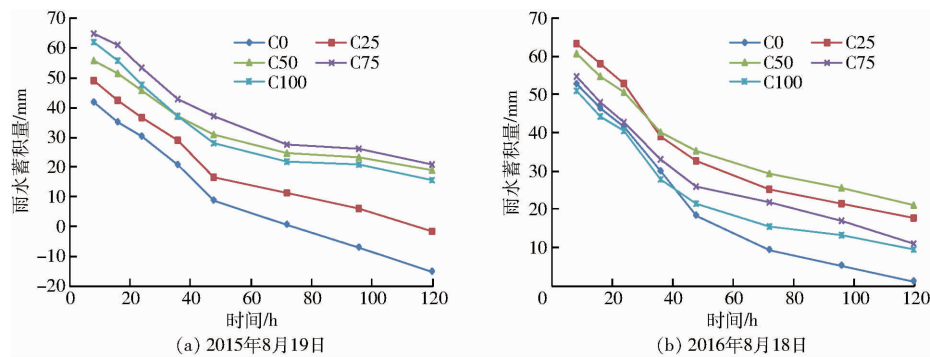


图 3 降雨后 0~100 cm 土层雨水蓄积量变化  
Fig.3 Change of rainwater accumulation in 0~100 cm soil after rainfall

2.5 施加生物炭对大豆产量以及水分利用效率的影响

2.5.1 对大豆产量及其构成因素的影响

不同处理的大豆产量及其构成要素见表 6。2015 年试验表明,施加生物炭对大豆产量以及各构成因素均有积极影响,大豆产量随生物炭施加量的

增加呈先增后降的趋势,两者之间的 Spearman 相关系数为 0.906(相关性在  $P = 0.05$  水平显著)。增产效果最好的为 C75 处理,相比 C0 处理对单株荚数与单株粒数 2 个要素的提高达到极显著水平( $P < 0.01$ ),对百粒质量的提高达到显著水平( $P < 0.05$ ),大豆增产率为 27.16%;2016 年连续施加生

物炭对大豆各产量构成要素的影响依然显著 ( $P < 0.05$ )。各处理产量仍呈先增后降的趋势,但与 2015 年不同,增产率至 C50 处理最高,为 28.17% ( $P < 0.05$ )。C75 与 C100 处理增产效果下降,增产率为 15.33% 和 11.90% (相比 C0 处理效果不显

著)。该年份大豆产量与生物炭施加量间的 Spearman 相关系数为 0.600 (相关性在  $P = 0.05$  水平不显著),说明施加生物炭量过高使得大豆的增产效果降低,两者相关性减弱。生物炭施入过量导致土壤结构变差、持水能力减弱,对作物生长产生一定影响。

表 6 各处理大豆产量与构成要素  
Tab.6 Soybean yield and components of each treatment

| 年份   | 处理   | 单株荚数/荚                     | 单株粒数/粒                      | 百粒质量/g                     | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )  | 增产率/% |
|------|------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------|
| 2015 | C0   | 33.33 ± 1.16 <sup>a</sup>  | 80.33 ± 2.52 <sup>a</sup>   | 18.39 ± 0.38 <sup>a</sup>  | 2 150 ± 98 <sup>a</sup>    |       |
|      | C25  | 38.67 ± 3.06 <sup>ab</sup> | 94.33 ± 4.04 <sup>b</sup>   | 20.54 ± 0.70 <sup>b</sup>  | 2 265 ± 112 <sup>ab</sup>  | 5.35  |
|      | C50  | 39.33 ± 1.16 <sup>ab</sup> | 98.33 ± 3.51 <sup>bc</sup>  | 20.64 ± 0.62 <sup>b</sup>  | 2 430 ± 169 <sup>abc</sup> | 13.02 |
|      | C75  | 48.67 ± 3.55 <sup>c</sup>  | 106.00 ± 2.00 <sup>c</sup>  | 21.55 ± 1.11 <sup>b</sup>  | 2 734 ± 142 <sup>c</sup>   | 27.16 |
|      | C100 | 42.00 ± 2.00 <sup>b</sup>  | 100.00 ± 2.00 <sup>bc</sup> | 19.97 ± 0.61 <sup>ab</sup> | 2 590 ± 82 <sup>bc</sup>   | 20.47 |
| 2016 | C0   | 31.67 ± 1.53 <sup>a</sup>  | 74.00 ± 2.00 <sup>a</sup>   | 18.22 ± 0.70 <sup>a</sup>  | 2 185 ± 117 <sup>a</sup>   |       |
|      | C25  | 36.00 ± 2.00 <sup>ab</sup> | 91.33 ± 3.06 <sup>b</sup>   | 21.72 ± 1.45 <sup>bc</sup> | 2 630 ± 174 <sup>b</sup>   | 20.37 |
|      | C50  | 41.33 ± 2.31 <sup>c</sup>  | 100.33 ± 3.69 <sup>b</sup>  | 23.29 ± 0.48 <sup>c</sup>  | 2 800 ± 185 <sup>bc</sup>  | 28.17 |
|      | C75  | 38.00 ± 2.00 <sup>bc</sup> | 95.00 ± 3.00 <sup>b</sup>   | 20.53 ± 0.94 <sup>ab</sup> | 2 520 ± 53 <sup>ab</sup>   | 15.33 |
|      | C100 | 37.67 ± 1.58 <sup>bc</sup> | 94.33 ± 2.31 <sup>b</sup>   | 19.91 ± 0.56 <sup>ab</sup> | 2 445 ± 215 <sup>ab</sup>  | 11.90 |

注:表中各数据采用均值 ± 标准差形式。

2.5.2 对大豆水分利用效率的影响

表 7 为 2015、2016 年试验各处理的大豆生育期耗水量(ET)与水分利用效率(WUE)。2015 年各处理大豆 WUE 由高到低排序为 C75、C100、C50、C25、C0,施加生物炭处理的 WUE 值均高于对照处理,提高幅度为 6.16% ~ 25.03%;2016 年连续施加生物炭后对大豆 WUE 同样产生不同程度提升效果,呈先升后降的趋势,C50 处理表现最优,较 C0 处理提高 27.67%,其后依次是 C75、C100、C25 处理,WUE 分别提高 11.91%、10.40%、9.68%。

表 7 2015 和 2016 年各处理大豆生育期耗水量与水分利用效率

Tab.7 Water consumption and water use efficiency in soybean growth periods in 2015 and 2016

| 处理   | 年份   | 生育期耗水量<br>/mm | 水分利用效率/<br>(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) |
|------|------|---------------|-----------------------------------------------------|
| C0   | 2015 | 270.39        | 7.95                                                |
|      | 2016 | 409.79        | 5.33                                                |
| C25  | 2015 | 268.30        | 8.44                                                |
|      | 2016 | 409.12        | 6.43                                                |
| C50  | 2015 | 271.64        | 8.95                                                |
|      | 2016 | 412.26        | 6.79                                                |
| C75  | 2015 | 275.13        | 9.94                                                |
|      | 2016 | 415.21        | 6.13                                                |
| C100 | 2015 | 275.57        | 9.40                                                |
|      | 2016 | 410.48        | 5.96                                                |

综合两年试验分析,连续施加 2 年生物炭 50 t/hm<sup>2</sup> 对大豆 WUE 的提高效果要比一次性施加 100 t/hm<sup>2</sup> 更理想,WUE 增长率高于后者 4.32 个百分点。大豆

的产量与生育期耗水量共同影响着其水分利用效率,施加生物炭强化了土壤对雨水的吸持与储存,减少地表流失,使得土壤水分更充分地补给作物根部。第一年生物炭最优施加量为 75 t/hm<sup>2</sup>,连续施加两年 50 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭对提高大豆 WUE 会达到更优的效果。

3 讨论

近年来,相关学者对坡耕地水土流失治理措施方面已进行大量研究<sup>[28-29]</sup>,大多有效措施存在工程量大、投入成本较高的问题。生物炭通过施入土壤即可改善土壤结构,达到节水保土的目的。该措施弥补了上述问题的同时,也具有较高的经济与生态效益。

本研究得出,秸秆生物炭可降低草甸黑土容重并提高孔隙度和土壤有机碳密度,且影响效果与生物炭施加量与施加年限呈正相关,这与魏永霞等<sup>[13]</sup>、尚杰等<sup>[18]</sup>研究成果结论一致。施加生物炭第 1 年各处理土壤田间持水量呈上升趋势,不同的是连续第 2 年施加各处理呈先升后降的趋势,生物炭量过高的处理对增强土壤持水性能的效果下降,这与 PENG 等<sup>[24]</sup>、DUGAN 等<sup>[30]</sup>结论一致。上述影响均在土壤三相比的变化上有所体现,第一年施加生物炭土壤容重发生改变,土壤固相体积比例降低,液相和气相体积比例随之增高,从而土壤的含水率和通气性增加,土壤结构较为合理,GSSI 得以提高。连续两年施加 50 t/hm<sup>2</sup> 生物炭时土壤结构得以最大程度地改善,施加量过高导致土壤性状松散,GSSI

也出现降低。

对于年降雨径流量的观测表明,施用生物炭可有效减少 3°坡耕地的年径流量,2015 和 2016 年减流量最大的处理分别为 C75 和 C50,较当年对照处理减少 15.44%、17.27%,SADEGHI 等<sup>[21]</sup>通过模拟试验得出相似规律。施加适量生物炭还增加了单次降雨 0~100 cm 土层深度雨水蓄积量并减缓其随时间下降的速率和幅度。

试验各年份施加生物炭大幅提高了大豆的产量,该结果与房彬等<sup>[8]</sup>、OBIA 等<sup>[12]</sup>一致。第 1 年施加生物炭 75 t/hm<sup>2</sup>时,在几种试验处理中增产效果最优;而连续两年(第 2 年)施加生物炭 50 t/hm<sup>2</sup>时,大豆产量的增幅则最大。这是由于适量的生物炭改善了土壤结构,增加了土壤中水分与有机质的含量,土壤碳氮比随之升高,土壤中氮素和其他养分的含量增加,土壤对大豆生长所需的水分和养分供应能力得以提升。此外,李晓龙等<sup>[27]</sup>通过研究发现,生物炭通过改善土壤物理结构,可促进耕层土壤中作物下层的细根生长。过量施用生物炭时,土壤的结构不再适宜作物生长,其持水能力也会减弱,另有可能过高的 C/N 会导致土壤氮固定<sup>[31]</sup>,土壤肥力下降。

综合两年试验的结果,连续施加两年生物炭 50 t/hm<sup>2</sup>时改善土壤结构与提高大豆水分利用效率的程度均达到最大,其效果优于 2015 年一次性施加生物炭 100 t/hm<sup>2</sup>的处理。因此,即便是在施加量相同的前提下,应注重其施加年际间的合理分配,以达到更加突出的效果。

面临着东北黑土区大面积垦殖的过程中造成的大片坡耕地水土流失等环境问题,为防治黑土退化,促进黑土区农业水土资源可持续利用,保障国家粮食安全,开展黑土区坡耕地水土保持与节水增产理论与技术研究十分必要。在全球对固碳减排高度关

注以及农业环境日益恶化的背景下,对生物质资源利用的必要性日渐突出<sup>[3]</sup>,生物炭作为土壤改良剂可促进当地丰富的秸秆资源循环高效利用,研究前景广阔。本试验在田间径流小区中进行,受自然等试验因素影响较大,本文仅分析了连续 2 年施加生物炭的情况,对于连续多年施加生物炭及其之后的效应问题,有待加长试验年限,进一步试验研究。

4 结 论

(1)施加秸秆生物炭可降低草甸黑土的容重,增加孔隙度,2 年试验中影响程度均与生物炭施加量呈显著正相关。2015 年各处理田间持水量随生物炭施加量的增加而升高,2016 年 C50 处理田间持水量增加效果达到最优,C75 和 C100 处理土壤持水性能下降。土壤有机碳密度各年份增加幅度分别为 31.4%~102.6%、62.2%~246.3%,均达到显著水平。

(2)施加适量生物炭可改善土壤结构,提高土壤液相率与气相率,土壤含水率与通气性明显提高。连续两年施加生物炭 50 t/hm<sup>2</sup>,GSSI 值高于其他处理,土壤结构得到较大程度改善。

(3)施加生物炭可以减少 3°坡耕地年径流量。2015 年 C75 处理减流效果最佳,径流系数降低 15.44%;2016 年表现最佳为 C50 处理,减流率为 17.27%。施入适量生物炭还增加了单次降雨后 0~100 cm 土层深度的雨水蓄积量,并使其随时间变化呈缓慢下降的趋势。

(4)施用生物炭对大豆的产量及其构成因素均有积极影响,同时对大豆 WUE 的影响程度也较大。2015 年表现最佳的处理为 C75,增产率为 27.16%,WUE 较 C0 提高 25.03%;2016 年连续施加的最佳施炭量为 50 t/hm<sup>2</sup>,增产率为 28.17%,其 WUE 较 C0 提高 27.67%,对坡耕地节水增产的积极效应更加突出。

参 考 文 献

1 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, 14(6):477-478.  
ZHAO Huiming. Present situation, cause of formation and control measures of soil and water loss in black soil area of Northeast China[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2008, 14(6):477-478. (in Chinese)

2 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1):1-8.  
LIU Baoyuan, YAN Baixing, SHEN Bo, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. Science of Soil & Water Conservation, 2008, 6(1):1-8. (in Chinese)

3 姚宗路, 赵立欣, 田宜水, 等. 黑龙江省农作物秸秆资源利用现状及中长期展望[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):288-292.  
YAO Zonglu, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Utilization status and medium and long-term forecast of crop straw resource in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):288-292. (in Chinese)

4 袁帅, 赵立欣, 孟海波, 等. 生物炭主要类型、理化性质及其研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5):1402-1417.  
YUAN Shuai, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. The main types of biochar and their properties and expectative researches[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(5):1402-1417. (in Chinese)

5 李力, 陆宇超, 刘娅, 等. 玉米秸秆生物炭对 Cd(Ⅱ)的吸附机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2277-2283.  
LI Li, LU Yuchao, LIU Ya, et al. Adsorption mechanisms of Cadmium(Ⅱ) on biochars derived from corn straw[J]. Journal of

- Agro-Environment Science, 2012, 31(11):2277–2283. (in Chinese)
- 6 韩光明, 蓝家祥, 陈温福, 等. 生物炭及其对土壤环境的影响[J]. 安徽农业科学, 2014(31):10941–10943.  
HAN G M, LAN J Y, CHEN W F, et al. Biochar and its influence on soil environment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014(31):10941–10943. (in Chinese)
- 7 卜晓莉, 薛建辉. 生物炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3):535–540.  
BU Xiaoli, XUE Jianhui. Biochar effects on soil habitat and plant growth: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3):535–540. (in Chinese)
- 8 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.  
FANG Bin, LI Xinqing, ZHAO Bin, et al. Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(8): 1292–1297. (in Chinese)
- 9 AJAYI A E, HOLTHUSEN D, HORN R. Changes in microstructural behaviour and hydraulic functions of biochar amended soils [J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155:166–175.
- 10 JIEN S H, WANG C S. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil [J]. Catena, 2013, 110(110):225–233.
- 11 NOVAK J, SIGUA G, WATTS D, et al. Biochars impact on water infiltration and water quality through a compacted subsoil layer [J]. Chemosphere, 2015, 142:160–167.
- 12 OBIA A, MULDER J, MARTINSEN V, et al. In situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 155:35–44.
- 13 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160825&journal\\_id=jcsam](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.  
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. (in Chinese)
- 14 ZHANG J, CHEN G, SUN H, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost[J]. Bioresource Technology, 2016, 200:876.
- 15 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6):54–61.  
GAO Decai, ZHANG Lei, LIU Qiang, et al. Application of biochar in dryland soil decreasing loss of nitrogen and improving nitrogen using rate[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6):54–61. (in Chinese)
- 16 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):128–134.  
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16):128–134. (in Chinese)
- 17 孙爱华, 华信, 朱士江. 生物炭对土壤养分及水分的影响[J]. 安徽农业科学, 2015(8):64–66.  
SUN Aihua, HUA Xin, ZHU Shijiang. Effect of biochar on soil nutrient and moisture[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015(8):64–66. (in Chinese)
- 18 尚杰, 耿增超, 陈心想, 等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3):509–517.  
SHANG Jie, GENG Zengchao, CHEN Xinxiang, et al. Effects of biochar on soil organic carbon and nitrogen and their fractions in a rainfed farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(3):509–517. (in Chinese)
- 19 勾芒芒, 屈忠义, 杨晓, 等. 生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1):137–142. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140122&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140122&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.022.  
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):137–142. (in Chinese)
- 20 车艳朋, 魏永霞. 生物炭对黑土区大豆节水增产及土壤肥力影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(1):55–58.  
CHE Yanpeng, WEI Yongxia. The impact of biochar on soybean in the black soil zone growth and soil fertility[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(1):55–58. (in Chinese)
- 21 SADEGHI S H, HAZBAVI Z, HARCHEGANI M K. Controllability of runoff and soil loss from small plots treated by vinasse-produced biochar[J]. Science of the Total Environment, 2015, 541:483–490.
- 22 HSEU Z Y, JIEN S H, CHIEN W H, et al. Impacts of biochar on physical properties and erosion potential of a mudstone slopeland soil[J]. The Scientific World Journal, 2014, 14(6):602197.
- 23 张燕辉. 生物炭连续四年还田对小麦产量和土壤固碳减排的中长期效应[D]. 淮北: 淮北师范大学, 2015.  
ZHANG Yanhui. Medium term effects of biochar application for 4 years on wheat yield and soil carbon sequestration[D]. Huaibei: Huaibei Normal University, 2015. (in Chinese)
- 24 PENG X, YE L L, WANG C H, et al. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: characteristics and its effects on soil properties of an ultisol in southern China[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 112(2):159–166.

14 BRIDGEMAN J. Computational fluid dynamics modelling of sewage sludge mixing in an anaerobic digester[J]. *Advances in Engineering Software*, 2012, 44(1):54 – 62.

15 WU B. CFD simulation of gas and non-Newtonian fluid two-phase flow in anaerobic digesters[J]. *Water Research*, 2010, 44(13):3861 – 3874.

16 WU B. CFD simulation of mixing in egg-shaped anaerobic digesters[J]. *Water Research*, 2010, 44(5):1507 – 1519.

17 WU B. Computational fluid dynamics investigation of turbulence models for non-Newtonian fluid flow in anaerobic digesters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(23):8989 – 8995.

18 WU B. CFD investigation of turbulence models for mechanical agitation of non-Newtonian fluids in anaerobic digesters[J]. *Water Research*, 2011, 45(5):2082 – 2094.

19 李希, 李兆奇, 管小平, 等. 气液鼓泡塔流体力学研究进展[J]. *高校化学工程学报*, 2015, 29(4):765 – 779.  
LI Xi, LI Zhaoqi, GUAN Xiaoping, et al. Progress in hydrodynamics of gas-liquid bubble columns[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2015, 29(4):765 – 779. (in Chinese)

20 ZHANG D, DEEN N G, KUIPERS J A M. Numerical simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column: a study of closures for turbulence and interface forces[J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(23):7593 – 7608.

21 BUMS A D, FRANK T, HAMILL I, et al. The favre averaged drag model for turbulent dispersion in Eulerian multi-phase flows [C]//5th International Conference on Multiphase Flow, Paper No 392, 2004;1 – 17.

22 DEWSBURY K H, KARAMANEV D G, MARGARITIS A. Hydrodynamic characteristics of free rise of light solid particles and gas bubbles in non-Newtonian liquids[J]. *Chemical Engineering Science*, 1999, 54(21):4825 – 4830.

23 SHAH R E, SAJJADI B, RAMAN A A, et al. Solid-liquid mixing analysis in stirred vessels[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2015, 31(2):119 – 147.

24 DÍAZ M E, IRANZO A, CUADRA D, et al. Numerical simulation of the gas-liquid flow in a laboratory scale bubble column: influence of bubble size distribution and non-drag forces[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 139(2):363 – 379.

25 BUWA V V, RANADE V V. Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi-group CFD simulations[J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(22 – 23):4715 – 4736.

26 ANSYS Inc. ANSYS FLUENT – 14.5 theory guide [M]. ANSYS Inc. ,2012.

27 LABORDE-BOUTET C, LARACHI F, DROMARD N, et al. CFD simulation of bubble column flows: investigations on turbulence models in RANS approach[J]. *Chemical Engineering Science*, 2009, 64:4399 – 4413.

28 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

(上接第 291 页)

25 马莉, 吕宁, 冶军, 等. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8):976 – 981.  
MA Li, LÜ Ning, YE Jun, et al. Effects of biochar on organic carbon content and fractions of gray desert soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8):976 – 981. (in Chinese)

26 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1):154 – 161.  
QIU Jianjun, WANG Ligang, LI Hu, et al. Modeling the impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1):154 – 161. (in Chinese)

27 李晓龙, 高聚林, 胡树平, 等. 不同深耕方式对土壤三相及玉米根系构型的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4):1 – 7.  
LI Xiaolong, GAO Julin, HU Shuping, et al. Effects of various cultivation approaches on the three-phase ratio of soil and root system structure of maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4):1 – 7. (in Chinese)

28 吕刚, 班小峰, 雷泽勇, 等. 东北黑土区坡耕地治理过程中的水土保持效应[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(6):51 – 55.  
LÜ Gang, BAN Xiaofeng, LEI Zeyong, et al. Benefit of soil and water conservation in the process of harnessing a sloping farmland in the black soil region, Northeast China[J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2009, 16(6):51 – 55. (in Chinese)

29 许晓鸿, 隋媛媛, 张瑜, 等. 黑土区不同耕作措施的水土保持效益[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(3):12 – 16.  
XU Xiaohong, SUI Yuanyuan, ZHANG Yu, et al. Effects of different tillages on the soil and water conservation benefits in Northeast black soil area of China[J]. *Science of Soil & Water Conservation*, 2013, 11(3):12 – 16. (in Chinese)

30 DUGAN E, VERHOEF A, ROBINSON S, et al. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: impact on water holding capacities (WHC) of three soils from Ghana[C]//19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World, 2010;9 – 12.

31 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭对改善土壤理化性质及作物产量影响的研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(5):1 – 5.  
GOU Mangmang, QU Zhongyi. Research on using biochar to agricultural soil amendment and crop yield[J]. *Soil & Fertilizer Sciences in China*, 2013(5):1 – 5. (in Chinese)