

## 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响

郑健, 李欣怡, 马静, 马彪, 王燕, 王磊

### 引用本文:

郑健, 李欣怡, 马静, 等. 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1111-1121.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1255>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 小麦-水稻秸秆还田对土壤有机质组成及不同形态氮含量的影响

张雅洁, 陈晨, 陈曦, 常江, 章力干, 郜红建

*农业环境科学学报*. 2015, 34(11): 2155-2161 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.017>

### 秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响

朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 杨俊诚, 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 张建峰, 姜慧敏

*农业环境科学学报*. 2018, 37(12): 2785-2792 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0165>

### 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响

尚杰, 耿增超, 陈心想, 赵军, 耿荣, 王森

*农业环境科学学报*. 2015(3): 509-517 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.013>

### 保护性措施对中低肥力黑土区有机质变化的影响

李贝, 丁广歌, 赵鹏飞, 周丹, 赵闯, 米国华, 张卫峰

*农业环境科学学报*. 2020, 39(4): 891-900 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0106>

### 生物炭对中性水稻土养分和微生物群落结构影响的时间尺度变化研究

盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 任天志, 王洪媛

*农业环境科学学报*. 2016, 35(4): 719-728 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.04.016>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑健, 李欣怡, 马静, 等. 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1111–1121.

ZHENG Jian, LI Xin-yi, MA Jing, et al. Effect of biogas slurry combined with straw biochar on soil organic matter and total nitrogen content[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1111–1121.



开放科学 OSID

# 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响

郑健<sup>1,2</sup>, 李欣怡<sup>1,3</sup>, 马静<sup>1,3</sup>, 马彪<sup>1,3</sup>, 王燕<sup>1,4</sup>, 王磊<sup>5</sup>

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 3. 甘肃省生物能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050; 4. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 兰州 730050; 5. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 兰州 730070)

**摘要:**为增加沼液中养分在土壤中的滞留量,提高沼液利用效率,本文采用室内土柱试验,研究了不同生物炭混掺量(CK、0.5%、1.0%、2.0%)、生物炭混掺厚度(0、5、10、15、20 cm)和土壤容重(1.30、1.35 g·cm<sup>-3</sup>)对土壤有机质和全氮含量的影响。结果表明:土壤容重相同时,土柱入渗液渗出速率随生物炭混掺量和混掺厚度的增加而增大;土壤容重不同时,1.35 g·cm<sup>-3</sup>土壤土柱入渗液渗出速率小于1.30 g·cm<sup>-3</sup>土壤,土壤有机质和全氮含量均呈1.30 g·cm<sup>-3</sup>土壤容重小于1.35 g·cm<sup>-3</sup>土壤容重;土柱内有机质和全氮含量随生物炭混掺量增大而逐渐增加,生物炭混掺量为2.0%时对土壤有机质和全氮含量影响最大;土柱内有机质含量随生物炭混掺厚度增大而逐渐增加,生物炭混掺厚度为20 cm时对土壤有机质含量影响最大,而全氮含量在土壤容重为1.30 g·cm<sup>-3</sup>、混掺厚度10 cm时影响最显著,土壤容重为1.35 g·cm<sup>-3</sup>、混掺厚度15 cm时效果较为显著。研究表明生物炭配施沼液时土壤有机质和全氮含量受生物炭混掺厚度、混掺量和土壤容重综合作用的影响。

**关键词:**沼液;生物炭;混掺量;混掺厚度;土壤有机质;土壤全氮

中图分类号:S27 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)05-1111-11 doi:10.11654/jaes.2019-1255

## Effect of biogas slurry combined with straw biochar on soil organic matter and total nitrogen content

ZHENG Jian<sup>1,2</sup>, LI Xin-yi<sup>1,3</sup>, MA Jing<sup>1,3</sup>, MA Biao<sup>1,3</sup>, WANG Yan<sup>1,4</sup>, WANG Lei<sup>5</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western China Energy & Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 4. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China; 5. Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** To increase the retention of nutrients in soil and improve the utilization efficiency of biogas slurry, the effect of different biochar mixing amounts (BMAs), biochar mixing thicknesses (BMTs), and soil bulk densities ( $\rho$ ) on soil organic matter (SOM) and total nitrogen (TN) content was studied in laboratory soil column experiments. The results showed that the infiltration rate of the soil column increased

收稿日期:2019-11-14 录用日期:2020-01-19

作者简介:郑健(1981—),男,甘肃会宁人,博士,副教授,主要从事农业水土工程方面的研究。E-mail:zhj16822@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51969012);甘肃省高等学校科技成果转化项目(2018D-04);甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA154);杨凌示范区产学研用协同创新重大项目计划(2018CXY-14);兰州理工大学红柳一流学科建设计划(0807J1);甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2019C-13)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China(51969012); Transformation Project of Scientific and Technological Achievements of Colleges and Universities in Gansu Province(2018D-04); The Natural Science Foundation of Gansu Province, China(18JR3RA154); Major Project Plan for Collaborative Innovation of Industry, University, Research and Application in Yangling Demonstration Area(2018CXY-14); Hongliu First Class Discipline Construction Plan of Lanzhou University of Technology(0807J1); Industrial Support and Guidance Project of Colleges and Universities in Gansu Province(2019C-13)

with increases in BMA and BMT when  $\rho$  remained constant. When  $\rho$  increased, the infiltration rate was lower in the soil column also increased; however, the SOM and TN content exhibited the opposite behavior. In contrast, the SOM and TN content in the soil column increased when BMA increased; the most remarkable impact was found for a BMA of 2.0%. Moreover, the SOM content rose with the increase in BMT; the biggest influence in these experiments for a BMT = 20 cm. The TN content with different BMTs was related to  $\rho$ ; when  $\rho=1.30$  and  $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , the effect was most significant for BMT =10 and 15 cm, respectively. The results indicate that the effect of biochar on SOM and TN content is also dependent on the BMA, BMT, and  $\rho$ .

**Keywords:** biogas slurry; biochar; biochar mixing amount; biochar mixing thickness; soil organic matter content; soil total nitrogen content

施肥是农业增产的重要措施。沼液中含有丰富的营养物质和维生素、生长素等生物活性物质,其结构简单,易于被作物吸收,能向作物提供氮、磷、钾等主要营养元素,有助于植物体内的氮代谢,可以促进植物根系发育,具有较好增产效果<sup>[1]</sup>。沼液已经被证明是一种很好的有机肥,可以改善田间土壤结构,增加土壤中有机质的含量。同时也有研究表明,随着沼液施用量的提高,植物叶片SPAD值、叶面积指数、干物质积累量也相应提高<sup>[2]</sup>。但沼液与传统施用肥料不同,它是一种液态肥,具有高水低肥的特点,如施用不合理会导致较固态肥料更容易下渗到深层土壤,使沼液中的养分得不到充分利用,降低沼液的养分利用效率。这不仅造成资源浪费,还可能对地下水造成一定的污染<sup>[3-5]</sup>。同时,根据实际调查,64%(467户)的农户认为沼液浓度低、肥效不如化肥<sup>[6]</sup>。因此,如何增加沼液养分在土壤中的滞留量,提高沼液中养分的利用效率,就成为沼液推广应用的关键。

生物炭是作物秸秆在限氧条件下经高温热解炭化产生的一类高度芳香化难溶性固态物质<sup>[7]</sup>。具有含碳量高、不易被微生物降解的特点,是一种增加土壤碳库、缓解全球气候变暖的理想材料<sup>[8-9]</sup>,广泛应用于农业土壤和环境生态等领域<sup>[10-12]</sup>。研究表明,生物炭施入土壤中可以增加土壤的饱和导水率、降低土壤容重、增加土壤孔隙度<sup>[13]</sup>、改善土壤质量、保持土壤肥力、增加土壤有机物质含量、提高碳在土壤中的封存时间、增加电导率<sup>[14]</sup>等诸多作用。同时,生物炭还能够强烈吸附环境介质中的有机污染物,消减其环境风险<sup>[15]</sup>,增加对土壤养分的吸附交换,降低土壤养分淋失损失<sup>[16]</sup>。

基于此,本研究将沼液高水低肥、易于植物吸收利用的特点与生物炭能够改善土壤物理性质且具有较强吸附能力的优势相结合,通过设置不同的生物炭混掺量、混掺厚度及不同土壤容重,探求生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响,为沼液在实际应用过程中存在的问题提供解决方案,为提高沼液施用过程中养分利用效率提供新的解决思路,同时也为

生物炭的农田利用拓宽了新模式。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验时间及供试材料

试验于2018年7—12月在兰州理工大学水利水电工程实验室进行。试验所用土壤(粉质壤土)取自甘肃省兰州市周边正常使用的农田,原土壤容重为 $1.32 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。土样采集深度为地表耕层0~40 cm,采集后自然风干、碾碎后剔除肉眼可见根系残叶等有机物质,并过2 mm筛备用,试验前测得土壤养分状况如下:土壤有机质含量为 $9.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为 $0.475 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH值为8.03。试验用生物炭为玉米秸秆生物炭,将风干的玉米秸秆粉碎过筛,并装满整个坩埚,加盖密封,置于箱式电阻炉中,先调节温度至 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,碳化1 h后升温至 $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 碳化2 h,使秸秆均匀受热、充分碳化。关闭电源,生物炭自然冷却至室温后取出,碾碎,过筛,储存于干燥器中备用,其固定碳为 $650 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效磷为 $10.20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾为 $55.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,容重为 $0.19 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,比表面积为 $9 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ ,pH为10.24,阳离子交换量为 $60.8 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。所用沼液取自甘肃省兰州市狗牙山正常产气的户用沼气池,发酵原料为牛粪,沼液的密度为 $1.006 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,总氮含量为 $2.43 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,有机质含量为 $10.75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,试验前用32目纱布过滤掉沼液中较大的悬浮颗粒后备用,并测定沼液基本物理性质及全氮含量。

### 1.2 试验设计

在室温 $[(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 条件下,通过室内土柱模拟试验<sup>[17]</sup>,探讨沼液施用条件下不同生物炭混掺量、生物炭混掺厚度和土壤容重对土壤有机质和全氮的影响规律。根据当地农田土壤的容重情况,本试验设置土壤容重为 $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (S1)和 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (S2),依据前期预试验结果设置生物炭混掺量为0.5%、1.0%和2.0%,相当于田间耕作施用量 $5$ 、 $10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $20 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,生物炭混掺厚度为 $5$ 、 $10$ 、 $15 \text{ cm}$ 和 $20 \text{ cm}$ 。入渗液采用1:8(沼液:水,体积比)的水、沼液混合液。同

时,设置生物炭添加量0的对照处理CK1( $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )和CK2( $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。为减小试验误差,每组试验做3次,共计78组试验,取平均值作为试验结果。

### 1.3 试验装置及方法

试验所用土柱为内径10 cm、高30 cm的圆柱形透明有机玻璃管,管上端开口,下端封闭,只留一个出水口收集渗出液。先在管底部装入约1 cm厚的用去离子水洗干净后自然风干的石英砂作为反滤层,按照所确定的2个容重分别将供试土壤分层填入土柱,因实际生产过程中农田土壤耕作层一般为20 cm深,故设置试验装土20 cm高,分别将按照0、0.5%、1.0%、2.0%的质量比计算的生物炭与土样充分混合,将备用土壤按设置土柱高度分层填充(每2 cm为1层),根据预设生物炭混掺厚度为5、10、15 cm和20 cm,先将未混掺生物炭的土壤填充至土柱高度15、10、5 cm和0 cm,再将混掺生物炭的混合土壤分别填入试验土柱至5、10、15 cm和20 cm,压实边缘,避免贴壁缝隙形成边际效应。表层再铺设一层约1 cm厚的石英砂,减少入渗液对土壤的冲击和干扰。试验开始时先用马氏瓶控制入渗水头,从土柱下端出水口处往上充水,直至液面到达土层以上,使土样充分饱和。然后从上往下施加1:8(沼液:水,体积比)的混合液进行入渗,并收集渗出液。为保证指标测定需要,每次渗出液收集量为30 mL,同时用电导率仪测定不同时刻渗出液电导率,待渗出液电导率基本不变或稳定增长时试验结束,试验结束后以土柱表面为起点,沿垂直方向每5 cm为一个剖面取样点进行样品采集,试验装置如图1所示。

### 1.4 测定方法及数据处理

渗出液电导率采用上海雷磁牌DDS-11A型电导率仪(测量范围: $0\sim 20\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,基本误差: $\pm 1.0\%$ FS)

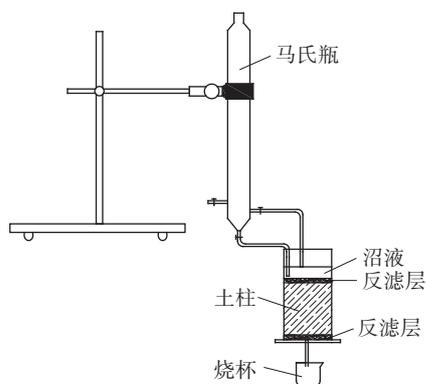


图1 试验装置

Figure 1 Test device

测定,土壤有机质含量采用高锰酸钾法测定<sup>[18]</sup>,渗出液及土壤中全氮含量采用凯氏定氮法测定<sup>[19]</sup>。数据处理与分析软件为Excel 2010和Origin 9.1。

## 2 结果与分析

### 2.1 生物炭配施沼液对入渗液渗出速率的影响

不同配比生物炭条件下土壤入渗液渗出速率情况如图2所示。由图可以看出,相同土壤容重和生物炭混掺量条件下,当生物炭混掺量为0.5%,土壤容重为 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,生物炭混掺土层厚度为5、10、15 cm和20 cm时其入渗液渗出速率分别较对照组CK1增加16.04%、25.87%、31.94%和37.74%,而土壤容重为 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时相应的入渗液渗出速率分别较对照组CK2增加11.89%、19.57%、22.28%和26.16%;相同生物炭混掺量和混掺土层厚度条件下,容重 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的渗出速率明显大于容重 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的渗出速率。表明当沼液配比相同时,入渗液渗出速率会受到土壤容重、生物炭混掺量和混掺厚度的影响。

### 2.2 生物炭配施沼液对土壤有机质含量的影响

#### 2.2.1 土壤容重对土壤有机质的影响

由图3可以看出,当生物炭混掺厚度一定,无论混掺量如何变化,土壤有机质含量均呈土壤容重 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 小于 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的。当生物炭混掺厚度为5 cm时,土壤容重 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 相对 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 土壤有机质的含量平均值仅高出 $0.41\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而当生物炭混掺厚度分别为10、15、20 cm时,容重 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 较 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的土壤有机质的含量平均值分别高出 $0.70$ 、 $1.18$ 、 $4.51\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。从土壤有机质含量增加幅度来看,当生物炭混掺量均为0.5%,生物炭混掺厚度分别为5、10、15 cm和20 cm时,土壤容重 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 较 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的有机质含量分别增加-0.28%、2.38%、3.42%和4.60%;当生物炭混掺量均为1.0%时,分别增加1.55%、1.13%、1.95%和11.93%;当生物炭混掺量均为2.0%时,分别增加-3.64%、2.82%、1.10%和7.24%。表明生物炭混掺厚度一定时,随混掺量逐渐增加,土壤容重 $1.35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 较 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 对有机质的影响增加,但当混掺量达到2.0%时,虽然土壤容重对有机质含量的影响依然呈增大趋势,但较混掺量为1.0%时增大趋势有所减小,表明生物炭混掺量超过某一定值后,土壤容重对土壤有机质可能会起到一定的抑制作用。

#### 2.2.2 生物炭混掺量对土壤有机质的影响

图4可以看出,当土壤容重一定时,无论生物炭混掺厚度如何变化,土壤有机质含量均呈现出生物炭

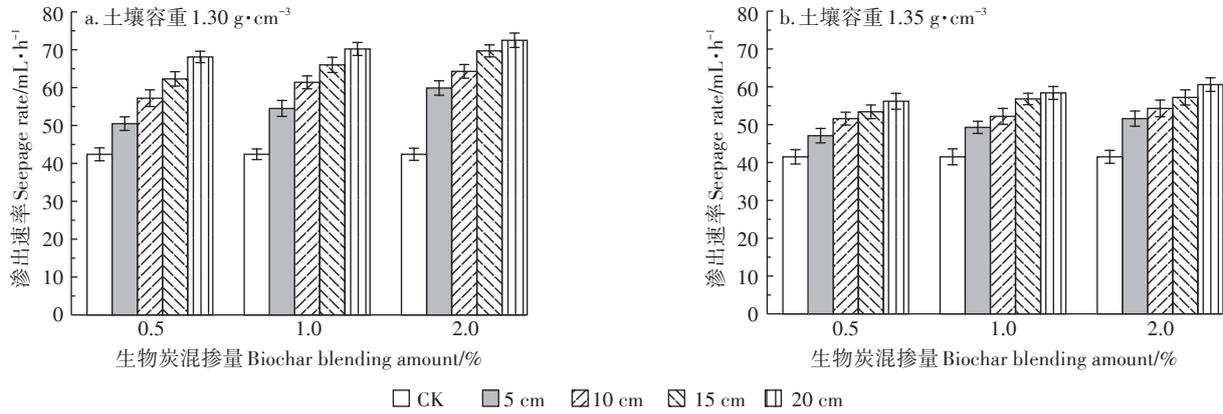


图2 不同配比生物炭处理下土柱渗出液渗出速率变化

Figure 2 Change of seepage rate of soil column treated with different proportions of biochar

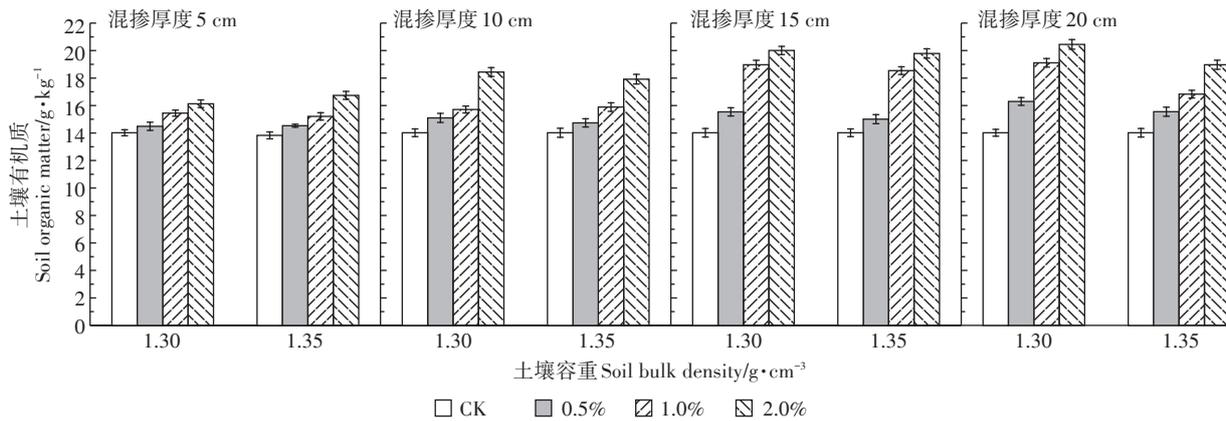


图3 不同配比生物炭处理下土壤容重对土壤有机质的影响

Figure 3 Effects of soil bulk density on soil organic matter under different ratios of biochar

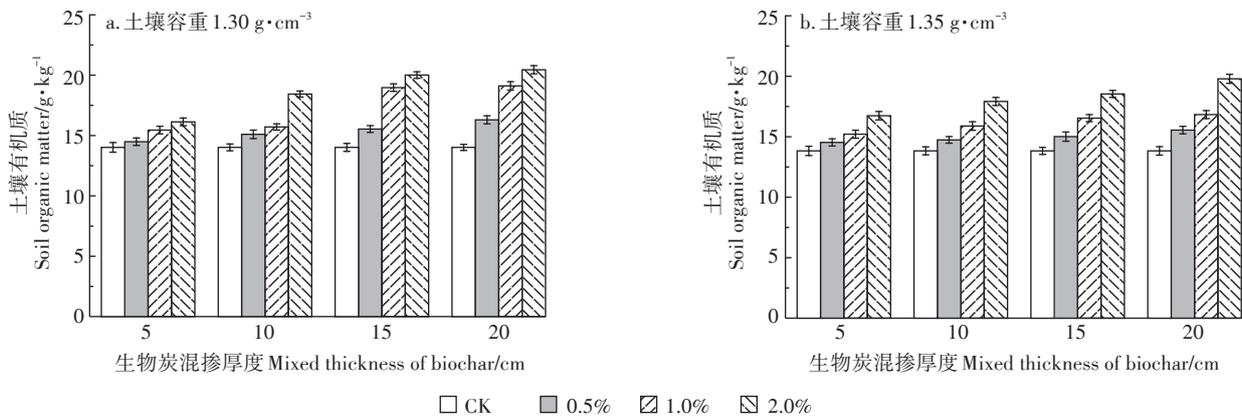


图4 不同配比生物炭处理下生物炭混掺量对土壤有机质的影响

Figure 4 Effects of biochar mixture on soil organic matter under different ratios of biochar

混掺量  $CK < 0.5\% < 1.0\% < 2.0\%$  的趋势。土壤容重为  $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 生物炭混掺厚度为 5 cm 时, 混掺量 0.5%、1.0%、2.0% 有机质含量分别比 CK1 高 3.24%、9.26%、13.08%, 而当生物炭混掺厚度为 10、15、20 cm 时, 混掺量 0.5%、1.0%、2.0% 有机质含量分别比 CK1 高

7.15%、10.76%、23.97%, 9.78%、20.82%、29.94%, 13.99%、26.64%、31.44%, 较混掺厚度 5 cm 对土壤有机质含量的影响明显增大; 土壤容重为  $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 生物炭混掺厚度为 5 cm 时, 混掺量 0.5%、1.0%、2.0% 有机质含量分别比 CK2 高 4.82%、9.07%、17.38%, 而

当生物炭混掺厚度为10、15、20 cm时,混掺量0.5%、1.0%、2.0%有机质含量分别比CK2高6.17%、7.86%、16.38%、25.40%、11.06%、17.83%、30.12%。说明当土壤容重一定时,土壤有机质含量呈现出随生物炭混掺量增加而逐渐增大的趋势,可能是因为生物炭添加到土壤中提高了土壤对有机质的吸持能力,进一步增加了土壤中有机质的含量。

### 2.2.3 生物炭混掺厚度对土壤有机质的影响

图5可以看出,当土壤容重一定时,无论生物炭混掺量如何变化,土壤有机质含量均呈现出生物炭混掺厚度CK<5 cm<10 cm<15 cm<20 cm的趋势。在图5(a)中,生物炭混掺量为0.5%、1.0%和2.0%时,生物炭混掺厚度5、10、15、20 cm分别比CK1高3.24%、7.15%、9.78%、13.99%,9.26%、10.76%、26.09%、26.64%和13.08%、23.97%、29.94%、31.44%。在图5(b)中,生物炭混掺量为0.5%、1.0%和2.0%时,生物炭混掺厚度5、10、15、20 cm分别比CK2高4.82%、6.17%、7.86%、11.06%,9.07%、12.96%、16.38%、17.83%和17.26%、22.82%、30.12%、30.75%。同时,研究还发现当生物炭混掺量为0.5%时,各混掺厚度对土壤有机质平均含量的增加幅度较其他混掺量情况下小,仅有3.24%(土壤容重 $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )和4.82%(土壤容重 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ),而当生物炭混掺量为2.0%时,最高增加幅度达到31.44%和30.75%。表明当土壤容重一定时,无论生物炭混掺量如何变化,土壤有机质含量均随生物炭混掺厚度增大而逐渐增加。

## 2.3 生物炭配施沼液对渗出液全氮含量的影响

### 2.3.1 土壤容重对渗出液全氮含量的影响

由图6可以看出,当生物炭混掺厚度一定,除了生物炭混掺厚度为10 cm外,其余各试验组渗出液全氮含量的整体变化规律一致,即渗出液全氮含量均呈

土壤容重 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ < $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,不受生物炭混掺量的影响。生物炭混掺厚度为5 cm时,渗出液全氮含量呈CK1>0.5%(S1)>CK2>1.0%(S1)>0.5%(S2)>2.0%(S1)>1.0%(S2)>2.0%(S2),生物炭混掺厚度为10 cm时,渗出液全氮含量呈CK1>CK2>0.5%(S2)>1.0%(S2)>0.5%(S1)>1.0%(S1)>2.0%(S2)>2.0%(S1),当生物炭混掺厚度为15 cm时,渗出液全氮含量呈CK1>CK2>0.5%(S1)>1.0%(S1)>0.5%(S2)>2.0%(S1)>1.0%(S2)>2.0%(S2),当生物炭混掺厚度为20 cm时,渗出液全氮含量呈CK1>0.5%(S1)>1.0%(S1)>2.0%(S1)>CK2>0.5%(S2)>1.0%(S2)>2.0%(S2)。说明当生物炭混掺厚度一定时,随生物炭混掺量的逐渐增加,土壤容重对渗出液全氮含量的影响逐渐加大,即土壤容重较大时生物炭配施沼液能更有效减少渗出液中全氮含量,对增加土壤中全氮含量有较为积极的作用。

### 2.3.2 生物炭混掺量对渗出液全氮含量的影响

由图7可知,各试验组渗出液的全氮累计含量值的整体变化规律基本一致,即整个试验期间,渗出液的全氮累计含量值逐渐增大并趋于稳定增长趋势,均呈现CK>0.5%>1.0%>2.0%。在图7(a)中,土壤容重为 $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,当生物炭混掺厚度为5 cm时,混掺量0.5%、1.0%、2.0%渗出液全氮累计含量分别比CK1低18.94%、24.84%、56.83%,当生物炭混掺厚度为10 cm时,渗出液全氮累计含量分别比CK1低62.11%、68.32%、86.02%,当生物炭混掺厚度为15 cm时,渗出液全氮累计含量分别比CK1低25.78%、47.83%、61.49%,当生物炭混掺厚度为20 cm时,渗出液全氮累计含量分别比CK1低3.42%、9.94%、22.05%。在图7(b)中,土壤容重为 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,当生物炭混掺厚度为5 cm时,混掺量0.5%、1.0%、2.0%渗出液全氮累

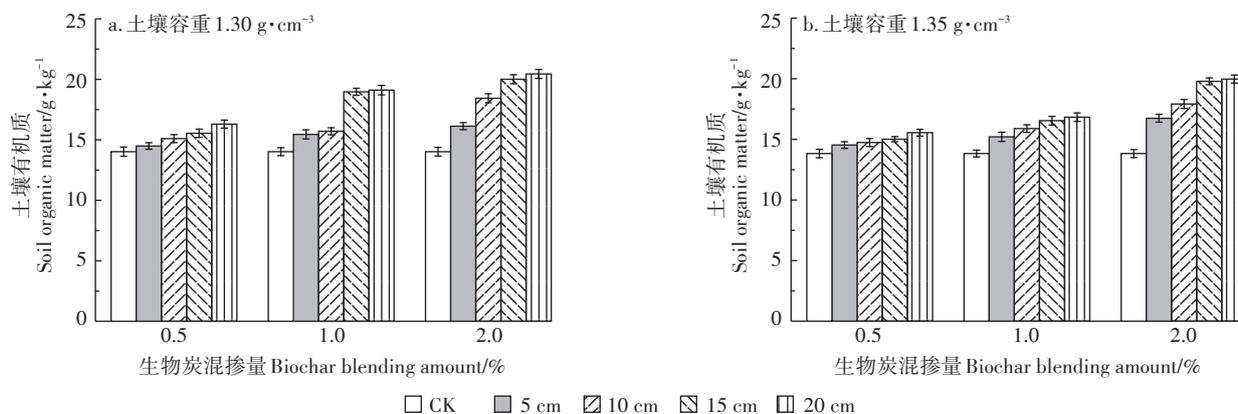


图5 不同配比生物炭处理下生物炭混掺厚度对土壤有机质的影响

Figure 5 Effects of biochar mixing thickness on soil organic matter under different ratios of biochar

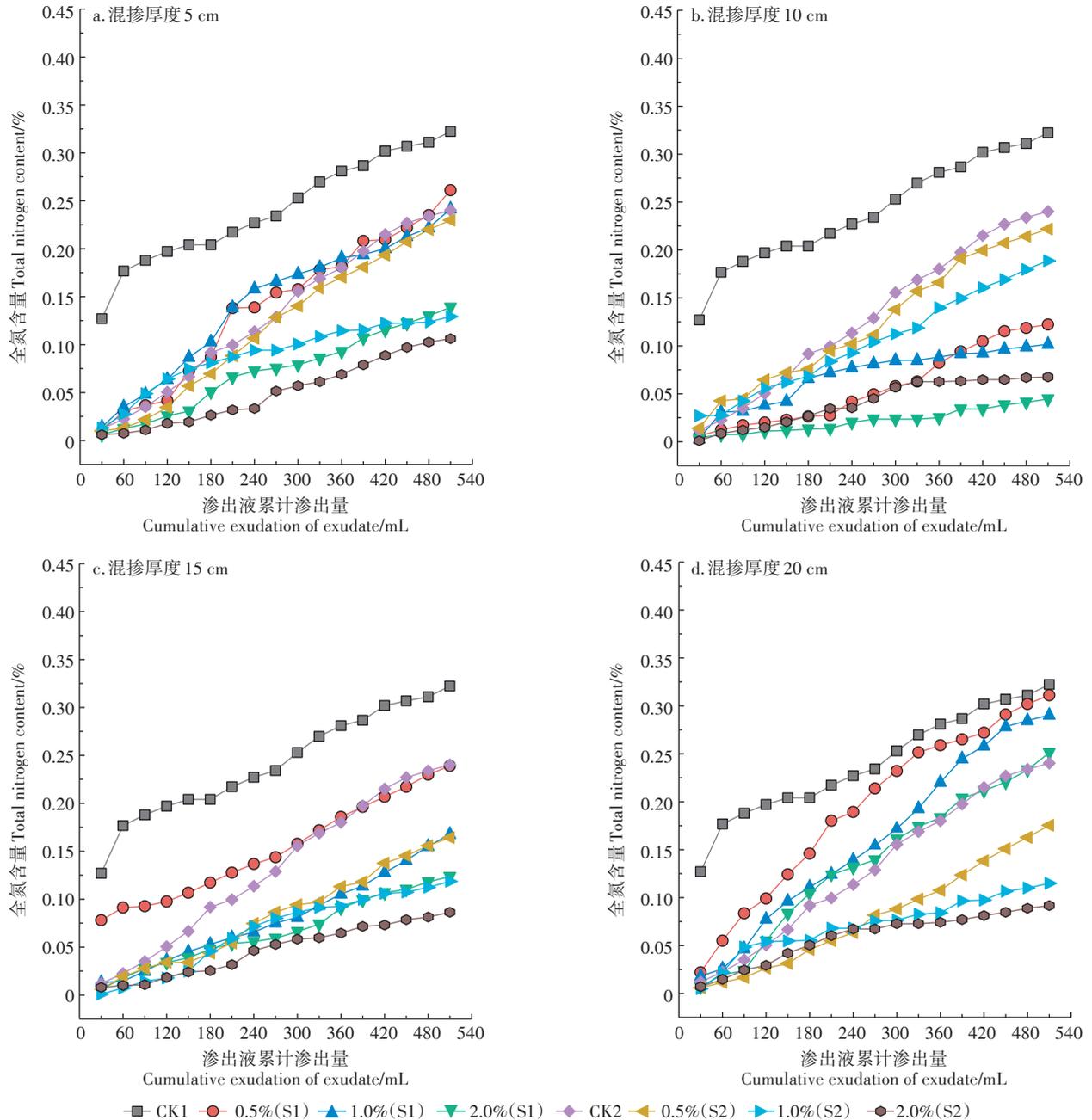


图6 不同配比生物炭处理下土壤容重对土壤全氮含量的影响

Figure 6 Effects of soil bulk density on soil total nitrogen content under different ratios of biochar

计含量分别比CK2低41.67%、46.25%、55.83%，当生物炭混掺厚度为10 cm时，渗出液全氮累计含量分别比CK2低7.50%、21.25%、71.67%，当生物炭混掺厚度为15 cm时，渗出液全氮累计含量分别比CK2低31.67%、50.42%、64.17%，当生物炭混掺厚度为20 cm时，渗出液全氮累计含量分别比CK2低27.08%、52.08%、61.67%。说明在试验范围内，土壤容重和生物炭混掺厚度一定，随生物炭混掺量的增加，渗出液中全氮累计含量降低，土壤固持氮能力增强。

### 2.3.3 生物炭混掺厚度对渗出液全氮含量的影响

由图8、图9可知，各试验组渗出液的全氮累计含量值的整体变化规律基本一致，即整个试验期间，渗出液的全氮累计含量值逐渐增大并趋于稳定增长趋势。在图8中，土壤容重均为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，当生物炭混掺量为0.5%时，渗出液全氮含量呈 $0 \text{ cm}(\text{CK1}) > 20 \text{ cm} > 5 \text{ cm} > 15 \text{ cm} > 10 \text{ cm}$ ，当生物炭混掺量为1.0%时，渗出液全氮含量呈 $0 \text{ cm}(\text{CK1}) > 20 \text{ cm} > 5 \text{ cm} > 15 \text{ cm} > 10 \text{ cm}$ ，当生物炭混掺量为2.0%时，渗出液全氮含量

呈0 cm(CK1)>20 cm>5 cm>15 cm>10 cm。在图9中,土壤容重为 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,生物炭混掺量为0.5%时,渗出液全氮含量呈0 cm(CK2)>5 cm>10 cm>20 cm>15 cm,生物炭混掺量为1.0%时,渗出液全氮含量呈0 cm(CK2)>10 cm>5 cm>15 cm>20 cm,生物炭混掺量为2.0%时,渗出液全氮含量呈0 cm(CK2)>5 cm>20 cm>15 cm>10 cm。土壤容重为 $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,混掺厚度为10 cm时影响最显著。土壤容重为 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,

混掺厚度为15 cm时效果较为显著,出现差异性可能和土壤容重有关,孔隙度不同,土壤渗出通道差异均会导致结果的差异性。

### 3 讨论

生物炭施入土壤中可以增加土壤的饱和导水率、降低土壤容重、增加土壤孔隙度以及土壤的入渗率<sup>[20]</sup>。本研究中沼液渗出速率随着生物炭混掺量的

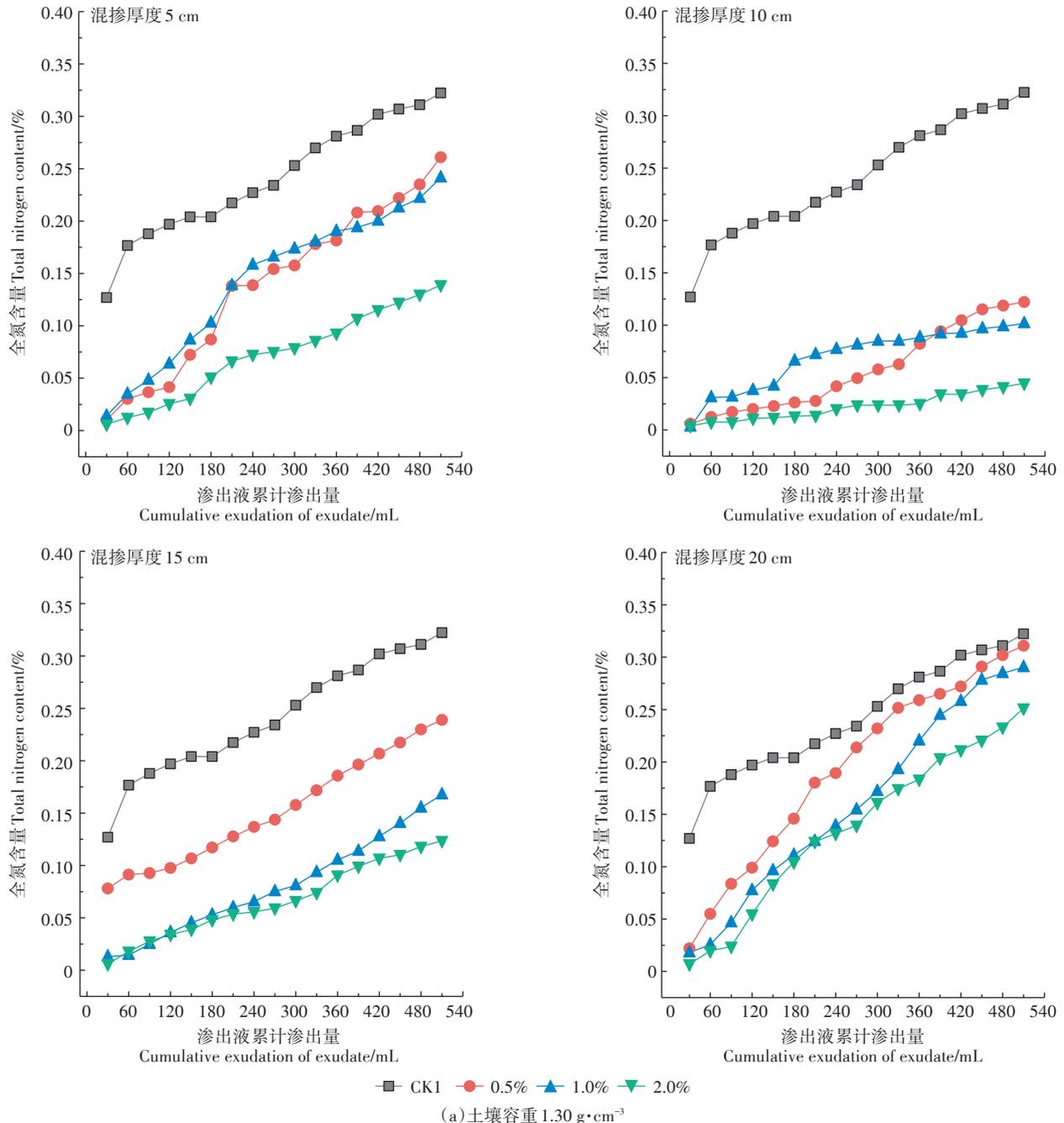
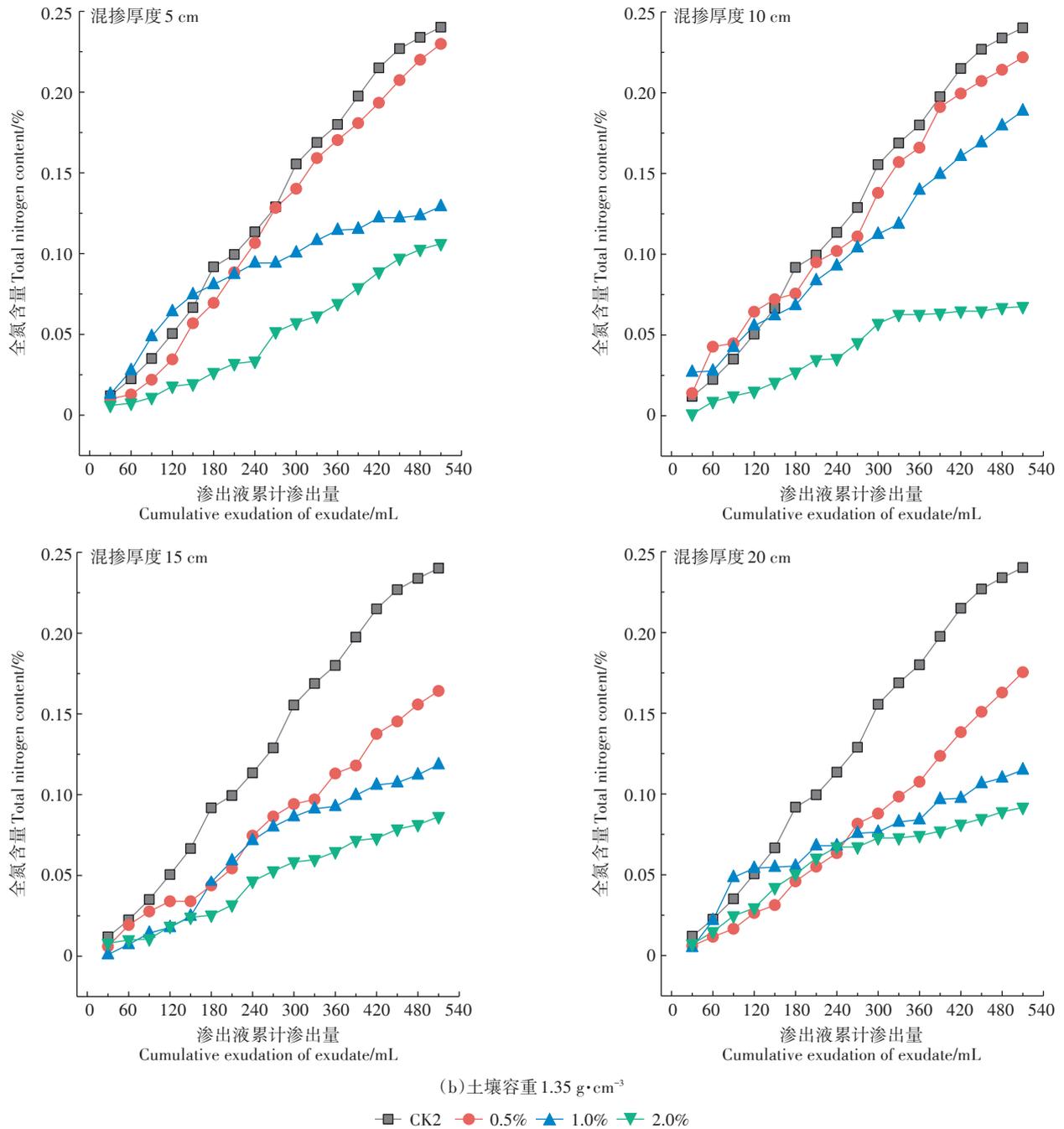


图7 不同配比生物炭处理下生物炭混掺量对全氮含量的影响

Figure 7 Effects of biochar mixture on total nitrogen content under different ratios of biochar



续图7 不同配比生物炭处理下生物炭混掺量对全氮含量的影响

Continued figure 7 Effects of biochar mixture on total nitrogen content under different ratios of biochar

升高呈现加快趋势,初步分析是因为生物炭本身具有较大的孔隙度和比表面积,可以改变土壤孔隙度和团聚体,使得土壤内部孔隙度增加,土壤渗水通道增多,促进水分渗透,且生物炭具有高度芳香化的结构,其表面含有羧基、酚羟基、羰基、酸酐基团,这些结构特性使其具备了良好的吸附特性及稳定性<sup>[21-22]</sup>,当入渗液经过混掺生物炭的土壤时,其中的养分会吸附到土壤中混掺的生物炭上,与土壤中原有的小颗粒胶

体发生运输作用促进入渗液的渗出速率。相关学者陈温福等<sup>[23]</sup>、Awad等<sup>[24]</sup>也通过试验论证了生物炭因为其多孔结构和比表面积,添加到土壤中能够增加土壤孔隙度及团聚体数量进而增加入渗液的渗出速率。

施用生物炭能明显改变土壤的理化性质,显著提高土壤有机质含量,为作物生长提供更优条件<sup>[25]</sup>。土壤中混掺生物炭后,当生物炭混掺量及混掺厚度一定时,土壤容重对土壤有机质含量产生影响,土壤有机

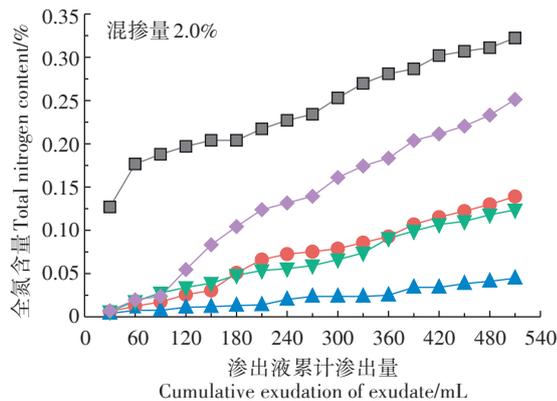
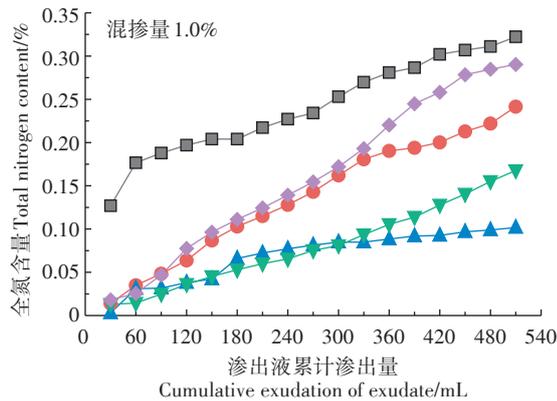
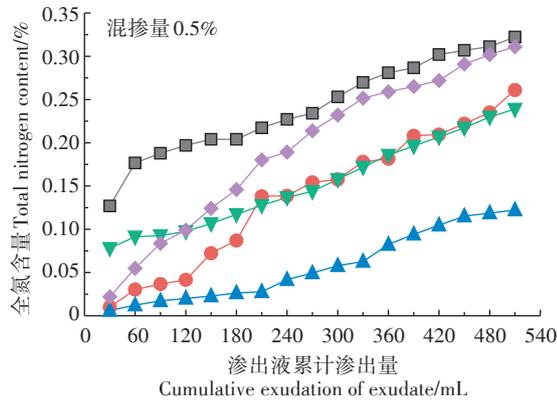


图8 不同配比生物炭处理下生物炭混掺厚度对土壤全氮含量的影响(土壤容重  $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

Figure 8 Effects of biochar blending thickness on soil total nitrogen content under different biochar ratios ( $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

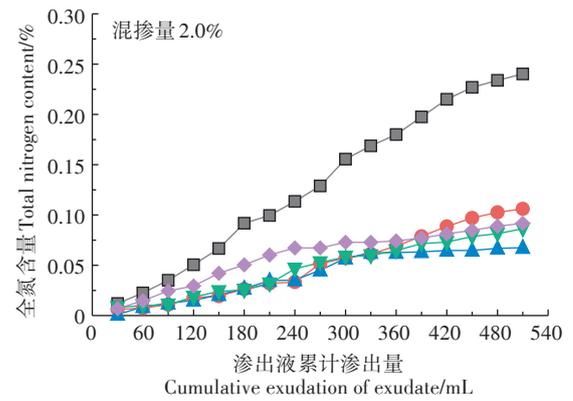
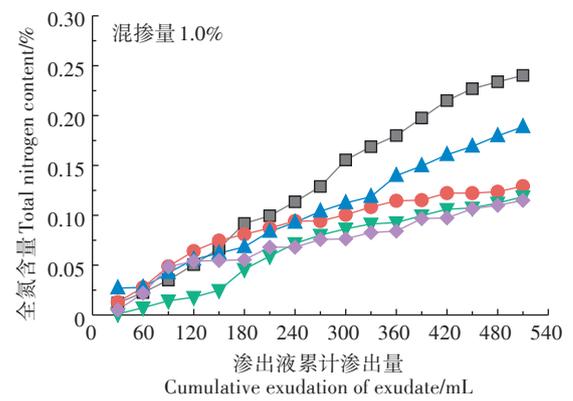
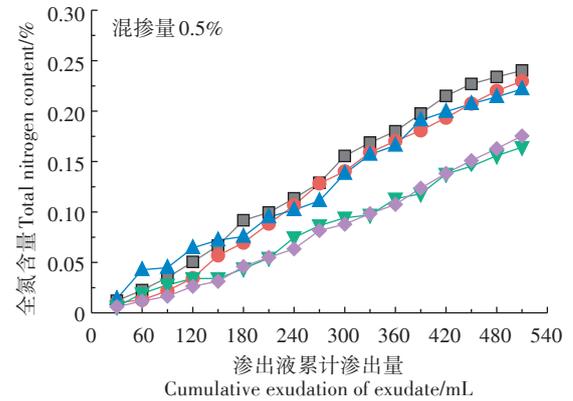


图9 不同配比生物炭处理下生物炭混掺厚度对土壤全氮含量的影响(土壤容重  $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

Figure 9 Effects of biochar blending thickness on soil total nitrogen content under different biochar ratios ( $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )

质含量呈现出随土壤容重逐渐增大而减小的趋势,这是因为生物炭具有容重低、黏性差及孔隙结构具有很大比表面积的特性<sup>[26]</sup>,添加到土壤后会降低土壤容重,增加土壤孔隙度,改善土壤生物活性<sup>[25]</sup>,而容重小的土壤本身孔隙度比例较容重大的土壤多,添加生物炭后使得土壤孔隙度进一步增加,对有机物质含量增加起到了进一步的促进作用,因此试验结果呈现出土

壤容重为  $1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的土壤添加生物炭后土壤有机质含量高于容重为  $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的土壤。同时,本研究还发现当土壤容重一定时,随着生物炭混掺厚度的变化,土壤有机质含量呈现出随生物炭混掺厚度增大而逐渐增加的趋势,初步分析是一方面由于沼液本身含有有机质<sup>[27]</sup>,另一方面生物炭添加到土壤中提高了土壤对有机质的吸持能力,进一步增加了土壤中有机质

的含量,这一结果与尚杰等<sup>[28]</sup>的研究结论一致。同时,有研究表明生物炭施入土壤能显著增加各土层不同粒级团聚体中有机碳<sup>[29]</sup>和有机质含量<sup>[30-31]</sup>,且增加幅度随施用量的增加而增大。本研究中当土壤容重一定时,土壤有机质含量呈现出随生物炭混掺量增加而逐渐增加的趋势,当混掺量为2.0%时,有机质含量达到最大,进一步验证了生物炭施用能增加土壤有机质含量的作用。说明土壤中有机质含量的提高幅度取决于土壤本身的性质<sup>[32]</sup>和生物炭的施用量。

施用生物炭能合理调控土壤有机氮库、提高土壤肥力及有机氮库的稳定性<sup>[33]</sup>。当生物炭混掺量及混掺厚度一定时,土壤全氮含量随土壤容重的增加而增大,这是因为随土壤容重增加,土壤密实度增大,配施相同配比的沼液,全氮滞留量较土壤容重小的土体有所增加。并且生物炭良好的吸附能力也促进了土壤中全氮量的增加。本研究还发现当土壤容重一定时,随生物炭混掺量的增加,渗出液的全氮累计含量逐渐增大并趋于稳定增长趋势,说明生物炭配施沼液对土壤全氮含量的增加起积极作用;随土壤容重的增大,渗出液的全氮累计含量有所降低,而土体内全氮含量有所增加,土壤中全氮含量的提高幅度不仅仅取决于生物炭的施用量,还取决于土壤的基本性质和土壤的质地。

#### 4 结论

(1) 土壤中添加生物炭能够增加入渗液渗出速率,且随着生物炭混掺厚度和混掺量的增加,入渗液渗出速率也随之加快,土壤容重  $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时较  $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  入渗液渗出速率减小。

(2) 当生物炭混掺量及混掺厚度一定时,土壤容重  $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  较  $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  有机质含量大;当土壤容重一定时,土壤有机质含量随生物炭混掺量增加而增大,其中生物炭混掺量为2.0%时对土壤有机质含量影响最大,与生物炭混掺厚度无关;当土壤容重一定时,土壤有机质含量随生物炭混掺厚度增加而逐渐增大,生物炭混掺厚度为20 cm时对土壤有机质含量影响最大,与生物炭混掺量无关。

(3) 当生物炭混掺量及混掺厚度一定时,土壤全氮含量随土壤容重逐渐增大而增大;当土壤容重一定时,土壤全氮含量随生物炭混掺量增加而增大,其中生物炭混掺量为2.0%时对土壤全氮含量影响最大;当土壤容重一定时,土壤全氮含量随生物炭混掺厚度增加而逐渐增大,但无明显规律性影响趋势,可能受

土壤质地和生物炭混掺量影响。

#### 参考文献:

- [1] 吴树彪,崔 畅,张笑千,等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 118-125.  
WU Shu-biao, CUI Chang, ZHANG Xiao-qian, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 118-125.
- [2] Rahnam M M, Rahman S M E, Oh D H, et al. Effects of biogas slurry on the production and quality of maize fodder[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2018, 34: 91-99.
- [3] 王忠江,蔡康妮,王丽丽,等. 施灌沼肥对土壤氨挥发和氮素下渗规律的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 139-144.  
WANG Zhong-jiang, CAI Kang-ni, WANG Li-li, et al. Influence of biogas slurry application on ammonia volatilization and nitrogen infiltration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 139-144.
- [4] Dauden A, Quilez D. Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a mediterranean irrigated environment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 21(1): 7-19.
- [5] 杜臻杰,齐学斌,李 平,等. 猪场废水灌溉对土壤氮素时空变化与氮平衡的影响[J]. 农业机械学报, 2017(8): 267-274.  
DU Zhen-jie, QI Xue-bin, LI Ping, et al. Effect of piggery wastewater irrigation on temporal-spatial variation and balance of nitrogen[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017(8): 267-274.
- [6] 张国治,吴少斌,王焕玲,等. 大中型沼气工程沼渣沼液利用意愿现状调研及问题分析[J]. 中国沼气, 2009, 28(1): 21-24.  
ZHANG Guo-zhi, WU Shao-bin, WANG Huan-ling, et al. Investigation and analysis of the current situation of the utilization intention of biogas sludge and biogas slurry in large and medium-sized biogas projects[J]. *China Biogas*, 2009, 28(1): 21-24.
- [7] 高 阳,邵光成,陈昌仁,等. 渍害条件下土壤添加生物炭对番茄生长及产量的影响研究[J]. 排灌机械工程学报, 2019: 1-9.  
GAO Yang, SHAO Guang-cheng, CHEN Chang-ren, et al. Effects of biochar on tomato growth and yield under waterlogged condition[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2019: 1-9.
- [8] José A A, Salazar P, Vidal B, et al. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(3): 475-484.
- [9] 吴伟祥,孙 雪,董 达,等. 生物质炭土壤环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
WU Wei-xiang, SUN Xue, DONG Da, et al. Environmental effects of biomass charcoal on soil[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] Glaser 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.
- [11] Glaser B, Haumaier L, Guggenberger G, et al. The 'Terra Preta' phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics[J]. *Naturwissenschaften*, 2001, 88: 37-41.

- [12] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2):395-419.
- [13] 王红兰,唐翔宇,张维,等.施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响[J].农业工程学报,2015,31(4):107-112.  
WANG Hong-lan, TANG Xiang-yu, ZHANG Wei, et al. Effects of biochar application on hydraulic properties of tillage soil in purple slope farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(4):107-112.
- [14] Stephanie T, Ponge J F, Ballof S. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(1):15-21.
- [15] Kimetu J M, Lehmann J. Stability and stabilisation of biochar and green manure in soil with different organic carbon contents[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2010, 48(7):577-585.
- [16] 李江舟,姜翼来,张立猛,等.不同生物炭添加量下植烟土壤养分的淋失[J].植物营养与肥料学报,2015(4):1075-1080.  
LI Jiang-zhou, LOU Yi-lai, ZHANG Li-meng, et al. Leaching loss of nutrients in tobacco-growing soils with different biochar additions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015(4):1075-1080.
- [17] 李绣红,管仪庆,张丹蓉,等.典型红壤中硝态氮垂直运移的模拟比较[J].湖南农业科学,2011(23):45-48,64.  
LI Xiu-hong, GUAN Yi-qing, ZHANG Dan-rong, et al. Simulation comparison of nitrate vertical transport in typical red soil[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011(23):45-48,64.
- [18] 郝国辉,邵劲松.土壤有机质含量测定方法的改进研究[J].农业资源与环境学报,2014,31(2):202-204.  
HAO Guo-hui, SHAO Jin-song. Improvement of soil organic matter content determination method[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(2):202-204.
- [19] 谢小玲,李海锋,李雪莹,等.土壤全氮半微量定氮法与自动定氮仪定氮法的比较分析[J].生态环境学报,2012,21(6):1071-1074.  
XIE Xiao-ling, LI Hai-feng, LI Xue-ying, et al. Comparison and analysis of semi-micro nitrogen determination method and automatic nitrogen determination method for soil total nitrogen[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6):1071-1074.
- [20] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2010, 171(4):591-596.
- [21] Sandeep K, Reginald E M, Lal C R, et al. Biochar preparation from *Parthenium hysterophorus* and its potential use in soil application[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 55:67-72.
- [22] Pusker R, Jose L, Garcia M, et al. Removal of copper and cadmium from aqueous solution using switchgrass biochar produced via hydrothermal carbonization process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 109:61-69.
- [23] 陈温福,张伟明,孟军.生物炭与农业环境研究回顾与展望[J].农业环境科学学报,2014,33(5):821-828.  
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Review and prospect of biochar and agricultural environment research[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):821-828.
- [24] Awad Y M, Blagodatskaya E, Ok Y S, et al. Effects of polyacrylamide, biopolymer, and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by  $^{14}\text{C}$  and enzyme activities[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 48:0-10.
- [25] 陈心想,何绪生,耿增超,等.施用生物炭后土壤生物活性与土壤肥力的关系[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):47-54.  
CHEN Xin-xiang, HE Xu-sheng, GENG Zeng-chao, et al. The relationship between soil biological activity and soil fertility after application of biochar[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3):47-54.
- [26] Andreas S, Vanja A, Rolf D V, et al. Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition[J]. *Chemosphere*, 2016, 142:100-105.
- [27] 李文涛.沼液对土壤改良作用研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.  
LI Wen-tao. Study on the effect of biogas slurry on soil improvement [D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2013.
- [28] 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 Zeng-chao, CHEN Xin-xiang, et al. Effects of biochar application on soil organic carbon, nitrogen and their components in dry farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):509-517.
- [29] 米会珍,朱利霞,沈玉芳,等.生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(8):1550-1556.  
MI Hui-zhen, ZHU Li-xia, SHEN Yu-fang, et al. Effects of biochar on distribution of soil organic carbon and nitrogen in aggregates in dry farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1550-1556.
- [30] 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 Xin-qing, ZHAO Bin, et al. Effects of biochar on soil physicochemical properties and crop yield in dry farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(8):1292-1297.
- [31] Schmidt M W I, Noack A G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3):777-793.
- [32] Jeddery S, Verheijen F G A, Vande V M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 144(1):175-187.
- [33] Qadeer S, Batool A, Rashid A, et al. Effectiveness of biochar in soil conditioning under simulated ecological conditions[J]. *Soil and Environment*, 2014, 33(2):149-158.