

# 絮凝黄河泥沙复配生物炭对盐碱土水盐运移及水力特征参数影响

李争争<sup>1</sup>, 屈忠义<sup>1,2</sup>, 王丽萍<sup>1</sup>, 高晓瑜<sup>1</sup>, 何婧<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;

2.内蒙古农业大学寒旱区灌溉排水研究所,呼和浩特 010018)

**摘要:** 通过室内环刀试验,研究絮凝黄河泥沙复配生物炭对盐碱土水盐运移及水力特征参数的影响。将生物炭和絮凝黄河泥沙按4:6质量比混合成土壤改良剂,再将复配后的土壤改良剂按0.1%,2%,3%,6%,10%混合到盐碱土中。结果表明:(1)随着土壤改良剂添加量的增加,土壤孔隙度及水分含量不断增大,10%添加量下的土壤孔隙度和水分含量较未添加改良剂的处理平均增加了12%;(2)土壤饱和导水率在3%的添加量下最大,较未添加处理增大68.9%;(3)土壤改良剂添加量越大水分扩散的越慢,土壤pH越大,降低盐分的效果越不明显,试验发现3%添加量下土壤盐分降低的较为明显,17cm以上盐分降低量达到30%~50%,但土壤pH增大不明显,仅增大4%左右,波尔兹曼参数 $\lambda$ 增加31.5%,水分扩散速率较快。综合考虑,3%添加量处理可以较为有效地提高土壤孔隙度、土壤水分含量、饱和导水率、水分扩散率,并降低土壤表层盐分。

**关键词:** 生物炭;黄河泥沙;土壤物理性质;水盐运移

**中图分类号:** S278

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2020)03-0326-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.047

## Effect of Flocculating Yellow River Sediment with Biochar on Water-Salt Transport and Hydraulic Characteristic Parameters of Saline Soil

LI Zhengzheng<sup>1</sup>, QU Zhongyi<sup>1,2</sup>, WANG Liping<sup>1</sup>, GAO Xiaoyu<sup>1</sup>, HE Jing<sup>1</sup>

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2. Institute of Irrigation and Drainage in Cold and Arid Regions, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

**Abstract:** The purpose of this study is to analyze the effect of biochar compounded with flocculated yellow river sediment on the water and salt transport and hydraulic characteristic parameters of saline soil through the laboratory tests with ring-knife. Firstly, biochar and flocculated Yellow River sediment were mixed into soil improver at the mass ratio of 4:6, and then the soil improver was mixed into saline soil as the proportion of 0, 1%, 2%, 3%, 6%, and 10%. The results showed that: (1) Soil porosity and water content increased with the increase of soil improver. The soil porosity and water content under the 10% level are average increased 12% than the control treatment. (2) The saturated hydraulic conductivity of soil reaches the maximum at 3% addition, which is 68.9% higher than that control. (3) The additional amount of soil improver is inversely proportional to the rate of water diffusion, so that the soil pH value is higher, and then have the small effect of salt leaching. It was found that the decrease of soil salt was more obvious when the content of 3% was added. The amount of salt reduction above 17 cm reaches 30%~50%, but the increase in soil pH is only about 4%. The Boltzmann parameter  $\lambda$  increased by 31.5%, and the water diffusion rate was faster. All things considered, applying 3% soil improver can effectively increase soil porosity, soil water content, saturated hydraulic conductivity, water diffusivity, and reduce the soil salinity on the surface.

**Keywords:** biochar; Yellow River sediment; soil physical properties; water and salt transport

收稿日期:2019-11-25

资助项目:内蒙古自治区科技成果转化项目(CGZH2018138);内蒙古科技厅科技计划项目(2019)1356

第一作者:李争争(1995-),女,在读硕士研究生,主要从事盐碱地水盐运移研究。E-mail:lizhengzheng0411@163.com

通信作者:屈忠义(1969-),男,博士生导师,主要从事区域土壤水盐环境及节水灌溉理论技术应用研究。E-mail:quzhongyi@imau.edu.cn

河套灌区是一个盐碱土较为严重的地区,该地区的盐碱地分布较为广泛,占总耕地面积 45%左右,其中轻、中、重度盐碱地分别为 171 333,98 667,52 667  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。河套地区土壤的母质含盐量高,且地下水位及矿化度较大,土壤蒸发较强使得盐分在土壤表层聚集<sup>[2]</sup>。该地区灌溉方式主要以黄河水漫灌为主,黄河水的漫灌不但浪费水资源,还会造成次生盐渍化问题。引黄滴灌技术在巴彦淖尔市临河九庄试验站进行展开,利用“水梦”吸附剂吸附黄河水中的泥沙,高效利用黄河水资源<sup>[3]</sup>。每立方黄河水里约有 3~5 kg 的黄河泥沙,需要水梦吸附剂 50~100 g 才能够有效吸收黄河水中的泥沙。过滤后的黄河泥沙被搁置未被充分利用,占地面积会越来越大。因此,充分利用过滤后的黄河泥沙在盐碱地改良上,不仅有效解决泥沙堆积问题,还能够有效的改良盐碱土。

目前,改良盐碱地的方法有很多种包括秸秆深埋<sup>[4]</sup>、泥沙<sup>[5]</sup>、生物炭<sup>[6]</sup>等。Fei 等<sup>[7]</sup>研究 5%生物炭复配 1%的 PAM(聚丙烯酰胺)有效提高土壤孔隙度、饱和导水率及水分含量;Yang 等<sup>[8]</sup>发现,较低的生物炭添加量能够有效抑制水分蒸发,高生物炭添加量有效降低土壤盐分含量;武沛然<sup>[9]</sup>研究发现,生物炭与氮肥配比能够提高土壤孔隙度,土壤 pH 没有明显的变化,土壤电导率略微降低;王凡<sup>[10]</sup>研究发现,生物炭能够改善土壤孔隙度,但对土壤 pH 没有降低作用,土壤电导率降低的也不明显,复配木醋液能够明显降低土壤 pH 和电导率;贾利梅等<sup>[11]</sup>发现,引用黄河泥沙有效改善黏性土壤的孔隙度,增加土壤饱和导水率,有效降低土壤含盐量;周道玮等<sup>[12]</sup>将泥沙添加到盐碱土中发现,随着泥沙量的增多,土壤 pH 和电导率值逐渐降低。

众所周知黄河水的含沙量非常大,前人一般采用单独的掺沙试验或者单独的生物炭施加试验进行盐碱土的改良,生物炭和黄河泥沙混合改良盐碱土的试验少之又少,因此本试验的目的是充分利用黄河泥沙废料,探讨絮凝黄河泥沙废料和生物炭配比后的土壤改良剂对盐碱土是否起到改良作用,以及寻求能够有效改善土壤水分参数及水盐运移情况的适宜添加量。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

本研究于 2019 年 4—6 月在内蒙古农业大学室内实验室开展,将生物炭和絮凝黄河泥沙按 4:6 质量比混合复配成土壤改良剂,其中絮凝黄河泥沙的制备按黄河泥沙与水梦吸附剂 50:1 的质量比混合,再将复配后的土壤改良剂按 0.1%,2%,3%,6%,10%(CK、H1、H2、H3、H4、H5)的添加量混合到盐碱土中,5 个梯度的添加量是参照孔祥清等<sup>[6]</sup>、王凡<sup>[10]</sup>生物炭添加量而定,共计 6 个处理,每个处理 3 次重复。

### 1.2 供试材料

本试验的土壤于 2019 年 3 月取自河套灌区巴彦淖尔市临河区,采集地表 0—20 cm 的土壤,该土壤为盐碱土,将盐碱土取回后进行风干并过 2 mm 筛,供试土壤基本理化性质为:土壤容重为 1.45  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,电导率为 5.03  $\text{mS}/\text{cm}$ ,pH 为 8.81,土壤颗粒组成中沙粒占 36.37%,粉沙粒占 59.39%,黏粒占 4.24%。试验所用生物炭为玉米秸秆生物炭,试验前生物炭需过 2 mm 筛。供试生物炭基本理化性质为:生物炭的 pH 为 9.04,有机质为 925.74  $\text{g}/\text{kg}$ ,碳氮比为 67.03%。絮凝黄河沙由风干后过 2 mm 筛的黄河泥沙和水梦吸附剂(CS—001)混合配制而成,水梦吸附剂是一种不产生二次污染的环保型无机絮凝剂,为乳白色粉末,主要成分为高岭土、杭锦 2 号土,无味,pH 呈中性。

### 1.3 试验方法

将与改良剂(絮凝黄河泥沙和生物炭)混合后的盐碱土按 1.45  $\text{g}/\text{cm}^3$  的容重,装入环刀中,测定土壤毛管持水率、田间持水率、饱和持水率、毛管孔隙度、总孔隙度、容重、饱和导水率;土壤水分特征曲线采用压力薄膜法测定;土壤水分扩散率及水盐水平运移情况采用水平土柱法测定<sup>[13]</sup>;土壤质量含水率采用烘干法测定;采用水土比为 5:1 的浸提液利用 pH 计和电导率仪分别测定土壤的 pH 和电导率值<sup>[10]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

试验数据通过 Excel 2007 软件进行整理和绘图,采用统计分析软件 SPSS 19.0 进行不同处理的显著性分析,采用 RETC 软件分析不同处理的土壤水分特征曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤改良剂添加量对盐碱土孔隙度及土壤水分含量的影响

将不同添加量的土壤改良剂掺杂到土壤中,试验发现土壤孔隙度及水分含量的变化规律见表 1。H1、H2 处理与 CK 相比毛管持水率、田间持水率、饱和含水率、毛管孔隙度、总孔隙度无显著性差异( $P>0.05$ ),说明 1%,2% 的添加量对土壤的土壤孔隙度及水分含量无明显影响。随着添加量的升高,与 CK 相比土壤孔隙度及水分含量显著性不断增强( $P<0.05$ ),10% 添加量下土壤孔隙度及水分含量增加的最多,较 CK 毛管持水率、田间持水率、饱和含水率、毛管孔隙度、总孔隙度分别增加 12.5%,12.28%,11.83%,12.13%,10.67%。H2、H3、H4 处理下土壤孔隙度与水分含量差异性不显著,说明 2%,3%,6% 添加量下孔隙度与水分含量差别较小。研究<sup>[14]</sup>发现,随着生物炭用量和使用年限的增大,土壤容重呈现降低的趋势,随

添沙量的增加土壤容重逐渐降低<sup>[5]</sup>。本试验中当改良剂的添加量达到 6% 以上,随着生物炭和絮凝黄河泥沙量的增多,容重也呈现递减的趋势。环刀试验后土壤容重较环刀试验前装土容重发生变化的主要原因可能是由于供试土壤和改良剂混合后装入环刀,经过水浸泡后环刀土壤容重会发生改变。

表 1 不同土壤改良剂添加量下土壤孔隙度及水分含量情况

| 处理 | 毛管<br>持水率/% | 标准差   | 田间<br>持水率/% | 标准差   | 饱和<br>含水率/% | 标准差   | 毛管<br>孔隙度/% | 标准差   | 总孔<br>隙度/% | 标准差   | 环刀试验后土壤容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 环刀试验前装土容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|----|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|------------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| CK | 30.053d     | 0.232 | 28.677c     | 0.509 | 32.759c     | 0.368 | 42.797d     | 0.307 | 46.650c    | 0.493 | 1.424                               | 1.450                               |
| H1 | 30.280d     | 0.952 | 28.876c     | 0.980 | 33.160c     | 1.109 | 43.110d     | 1.353 | 47.210c    | 1.589 | 1.424                               | 1.450                               |
| H2 | 31.196cd    | 0.734 | 29.949bc    | 0.661 | 34.089bc    | 0.365 | 44.433cd    | 1.080 | 48.553bc   | 0.503 | 1.424                               | 1.450                               |
| H3 | 31.979bc    | 0.212 | 30.316b     | 0.569 | 34.998b     | 0.667 | 45.553bc    | 0.249 | 49.853b    | 0.923 | 1.424                               | 1.450                               |
| H4 | 32.612b     | 0.248 | 31.036ab    | 0.459 | 35.151b     | 0.552 | 46.417ab    | 0.294 | 50.030b    | 0.733 | 1.423                               | 1.450                               |
| H5 | 33.811a     | 0.160 | 32.200a     | 0.432 | 36.635a     | 0.416 | 47.987a     | 0.584 | 51.990a    | 0.449 | 1.419                               | 1.450                               |

注:CK、H1、H2、H3、H4、H5 分别表示添加量为 0、1%、2%、3%、6%、10%;同列中不同小写字母表示在 0.05 水平下有显著差异。

2.2 不同土壤改良剂添加量对盐碱土土壤水分特征曲线的影响

不同添加量下土壤 Van-Genuchten 模型参数见表 2。利用 RETC 软件模拟的土壤水分特征曲线,相关性均达到 97% 以上,由  $R^2$  可以看出,土壤实测值与 RETC 软件拟合程度较好,为了探究不同添加量之间的差异,以本试验不同添加量下的含水率为真值,计算其与 RETC 软件模拟值的残差平方和见表 3。得出 CK、H1、H2、H3、H4、H5 这 6 个处理的残差平方和分别为  $2.91 \times 10^{-4}$ ,  $1.53 \times 10^{-4}$ ,  $2.11 \times 10^{-4}$ ,  $4.5 \times 10^{-5}$ ,  $0.8 \times 10^{-5}$ ,  $2.3 \times 10^{-5}$ ,各个值均较小,几乎趋近于 0,从各个处理的残差平方和来看,拟合图形最好的为 H4 处理。通过表 2 中  $\alpha$  (进气吸力的倒数)和  $n$  (土壤吸水速率大小)参数分析发现,不

同的添加量处理下对  $\alpha$  和  $n$  值均有影响,对  $\alpha$  值影响较大,对  $n$  值影响较小,H3 处理较 CK 的  $\alpha$  值降低的最多,为 78.7%,H1 处理较 CK 降低最少为 18.6%。由于  $\alpha$  值越小进气吸力越大,土壤持水性越好,水分就不容易流失<sup>[15]</sup>。因此 3%、10%添加量下  $\alpha$  值都较小,说明此添加量下土壤保水性强,水分不容易流失。

表 2 不同土壤改良剂添加量下土壤 Van-Genuchten 模型参数

| 处理 | Van-Genuchten 模型参数 |          |        |
|----|--------------------|----------|--------|
|    | $R^2$              | $\alpha$ | $n$    |
| CK | 0.9724             | 0.2048   | 1.0830 |
| H1 | 0.9884             | 0.1677   | 1.0957 |
| H2 | 0.9851             | 0.1307   | 1.1018 |
| H3 | 0.9966             | 0.1146   | 1.1008 |
| H4 | 0.9994             | 0.1593   | 1.1134 |
| H5 | 0.9985             | 0.1164   | 1.1725 |

表 3 不同土壤改良剂添加量下土壤含水率实测值与模拟值残差平方和

| 土壤吸力值/<br>kPa | CK                    |        | H1                    |        | H2                    |        | H3                   |        | H4                   |        | H5                   |        |
|---------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|
|               | 实测                    | 拟合     | 实测                    | 拟合     | 实测                    | 拟合     | 实测                   | 拟合     | 实测                   | 拟合     | 实测                   | 拟合     |
| 0             | 0.2748                | 0.2745 | 0.2822                | 0.2810 | 0.2856                | 0.2838 | 0.2851               | 0.2840 | 0.2980               | 0.2980 | 0.3112               | 0.3110 |
| 10            | 0.2514                | 0.2512 | 0.2553                | 0.2572 | 0.2598                | 0.2623 | 0.2630               | 0.2647 | 0.2746               | 0.2749 | 0.2878               | 0.2888 |
| 20            | 0.2398                | 0.2405 | 0.2419                | 0.2452 | 0.2463                | 0.2503 | 0.2512               | 0.2533 | 0.2632               | 0.2630 | 0.2754               | 0.2755 |
| 40            | 0.2261                | 0.2288 | 0.2304                | 0.2319 | 0.2345                | 0.2365 | 0.2391               | 0.2398 | 0.2499               | 0.2498 | 0.2638               | 0.2603 |
| 60            | 0.2195                | 0.2218 | 0.2231                | 0.2238 | 0.2279                | 0.2280 | 0.2315               | 0.2314 | 0.2423               | 0.2419 | 0.2509               | 0.2512 |
| 80            | 0.2154                | 0.2169 | 0.2195                | 0.2181 | 0.2231                | 0.2220 | 0.2266               | 0.2254 | 0.2371               | 0.2363 | 0.2434               | 0.2448 |
| 100           | 0.2132                | 0.2131 | 0.2171                | 0.2138 | 0.2205                | 0.2173 | 0.2217               | 0.2208 | 0.2305               | 0.2320 | 0.2382               | 0.2399 |
| 200           | 0.2086                | 0.2015 | 0.2079                | 0.2005 | 0.2122                | 0.2030 | 0.2096               | 0.2065 | 0.2188               | 0.2191 | 0.2255               | 0.2256 |
| 400           | 0.1998                | 0.1903 | 0.1883                | 0.1878 | 0.1930                | 0.1895 | 0.1955               | 0.1929 | 0.2077               | 0.2069 | 0.2135               | 0.2126 |
| 600           | 0.1879                | 0.1841 | 0.1844                | 0.1807 | 0.1831                | 0.1819 | 0.1858               | 0.1852 | 0.2008               | 0.2002 | 0.2072               | 0.2056 |
| 800           | 0.1763                | 0.1798 | 0.1710                | 0.1758 | 0.1692                | 0.1767 | 0.1785               | 0.1800 | 0.1939               | 0.1956 | 0.2000               | 0.2009 |
| 1000          | 0.1661                | 0.1765 | 0.1667                | 0.1721 | 0.1686                | 0.1727 | 0.1721               | 0.1760 | 0.1930               | 0.1921 | 0.1971               | 0.1975 |
| 残差平方和         | $2.91 \times 10^{-4}$ |        | $1.53 \times 10^{-4}$ |        | $2.11 \times 10^{-4}$ |        | $4.5 \times 10^{-5}$ |        | $0.8 \times 10^{-5}$ |        | $2.3 \times 10^{-5}$ |        |

由图 1 可知,随着土壤吸力值的增加,H4、H5 处理的土壤含水率明显高于 CK,较 CK 土壤含水率分别增加 10%、13%左右,H1、H2 处理与 CK 的土壤含水率差距最小,在 3%左右。由此说明,在土壤遭到极大的压力时,6%、10%添加量下土壤所保持的水分最大,当土壤吸力值为 200~1 000 kPa 时,添加量为 1%、2%的土壤含水率低于未添加改良剂的土壤含水率,可能由于絮凝黄河泥沙和生物炭添加量较少,土壤孔隙度虽然增大,但

是由于添加量过少改良剂的保水性能不太明显,当遭受较大压力时水分从土壤中流失。

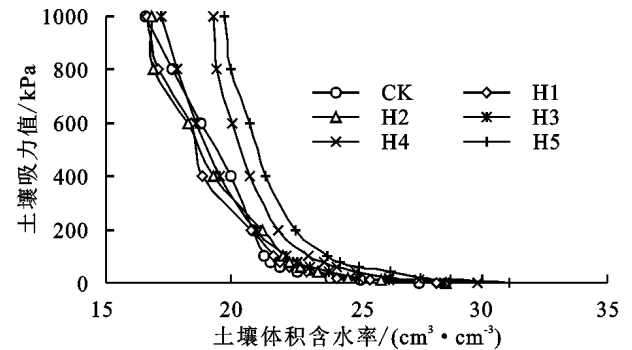


图 1 不同土壤改良剂添加量下土壤水分特征曲线

2.3 不同土壤改良剂添加量对盐碱土饱和和导水率的影响

通过研究絮凝黄河泥沙和生物炭复配对土壤饱和和导水率的影响发现,不同土壤改良剂添加量下饱和和导水率的标准差见表 4,分别为  $4.58 \times 10^{-4}$ ,  $7.51 \times 10^{-4}$ ,  $9.46 \times 10^{-4}$ ,  $7.36 \times 10^{-4}$ ,  $7.93 \times 10^{-4}$ ,  $5.72 \times 10^{-4}$ ,其均值误差非常小,几乎为零,说明 3 组重复的饱和和导水率测量结果相差不大。由于土壤固相为多孔体,土壤导水率与土壤孔隙度有着密切的函数关系,土壤孔隙的大小直接影响饱和和导水率<sup>[16]</sup>。由图 2 可知,从总孔隙度和饱和导水率关系分析,随着总孔隙度的增大饱和和导水率呈现先增大后降低的趋势,主要是由于当添加量 $>3\%$ 时,生物炭和絮凝黄河泥沙添加量增多,大孔隙减少,小孔隙增加使得饱和和导水率降低。与吕刚等<sup>[17]</sup>结论类似,他们发现添加牛粪后会分解大量的胶体物质,减小了大孔隙的分布,从而降低了饱和和导水率。从显著性分析饱和和导水率,H1 处理与 CK 无显著性差异( $P>0.01$ ),H2、H3、H4、H5 处理与 CK 有显著性差异( $P<0.01$ )。H2、H5 处理无显著差异( $P>0.01$ ),说明 2% 与 5% 添加量下的饱和和导水率所达到的效果一样。各个处理的饱和和导水率明显高于 CK,H3 处理饱和和导水率最大,较 CK 增加了 68.9%。前人<sup>[11]</sup>研究发现,泥沙添加量的增加对土壤饱和和导水率呈现增加的趋势,生物炭添加量的增加对土壤饱和和导水率呈现降低的趋势<sup>[18]</sup>。本试验中随着絮凝黄河泥沙和生物炭添加量的增加,土壤饱和和导水率呈现先增大后渐小的趋势,说明添加量为 1%,2%,3% 时,生物炭的含量很少,饱和和导水率主要受絮凝黄河泥沙的影响呈现增大的趋势,当添加量 $>3\%$ 时,饱和和导水率降低,主要是由于生物炭含量的增加降低了土壤饱和和导水率,但是由于絮凝黄河泥沙的含量大于生物炭的含量,所以虽然饱和和导水率降低但是却大于未添加改良剂处理的

饱和和导水率。

表 4 不同土壤改良剂添加量下饱和和导水率均值和标准差( $\times 10^{-4}$ )

| 处理  | CK     | H1     | H2     | H3     | H4     | H5     |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 均值  | 147.83 | 167.17 | 226.67 | 249.67 | 184.33 | 221.00 |
| 标准差 | 4.58   | 7.51   | 9.46   | 7.36   | 7.93   | 5.72   |

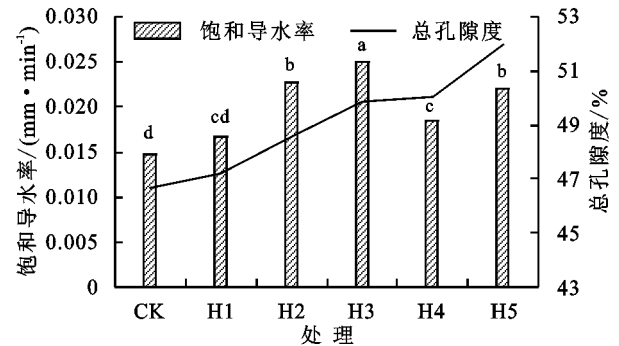


图 2 不同土壤改良剂添加量下土壤饱和和导水率与总孔隙度变化

2.4 不同土壤改良剂添加量对盐碱土土壤水分扩散率的影响

波尔兹曼参数  $\lambda$  表示水分在土壤水平入渗过程中,湿润峰向前推移的快慢程度。由图 3 可知,图线随着水分向前推移,土柱首部的含水率越大,波尔兹曼参数  $\lambda$  反而越小,说明土壤含水率越接近于饱和,水分向前运移的速度越慢。在相同含水率情况下,波尔兹曼参数  $\lambda$  呈现  $H1>H2>H3>H4>H5>CK$  的变化趋势,说明随着絮凝黄河泥沙和生物炭的添加量增加,水分在土壤水平入渗过程中速率越低,H1、H2、H3、H4、H5 处理波尔兹曼参数  $\lambda$  分别较 CK 的波尔兹曼参数  $\lambda$  增加 38.5%,34.4%,31.5%,23.1%,2.21%。1% 添加量下波尔兹曼参数  $\lambda$  最大,向前推进的速度越快,10% 添加量下波尔兹曼参数  $\lambda$  最小,向前推进的速度越小。该现象反映了生物炭的施加能够提高土壤的孔隙度,同时生物炭和絮凝黄河泥沙也具有良好的保水性能,絮凝黄河泥沙添加量增多会抑制水分向前推移。

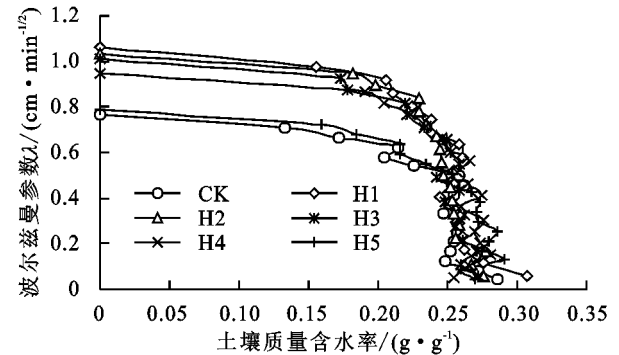


图 3 不同土壤改良剂添加量下波尔兹曼参数  $\lambda$  与土壤质量含水率  $\theta_m$  关系



2.5 不同土壤改良剂添加量对盐碱土水平方向上盐碱变化情况的影响

2.5.1 土壤的 pH 变化 基于水分扩散率试验探讨土壤水平运移方向 pH 变化情况,从图 4 可以看出,土壤 pH 变化主要在 9~11,由于絮凝无机黄河泥沙添加的吸附剂为中性,生物炭呈显碱性且 pH 为 9.04,因此生物炭的添加量主要影响土壤的 pH。随着添加量的增大,生物炭的含量也不断增大,pH 也逐渐增大。H5 处理土壤 pH 增加的最多,较 CK 在 15.3~18.7 cm 距离上的土壤 pH 增大 12.5%左右;H1、H2、H3 添加量下由于生物炭的含量不多,土壤 pH 增加的不明显;当添加量>3%时,生物炭的含量较多,土壤 pH 增加的较为明显。随着水分的水平距离上的运移,各个处理下均呈现先增大后减小,最后趋于稳定的变化趋势,说明水分运移会使得土壤的 pH 在一定的距离上累积,后期可能是在该时间下,水分子比碱性离子运移的快,使得土壤 pH 降低。通过该试验反映出来的现象说明生物炭并不是越多越好,有学者<sup>[19]</sup>也认为,生物炭添加量<20 g/kg 时,各处理的土壤 pH 无显著差异,当添加量>20 g/kg 时,土壤 pH 开始增长。

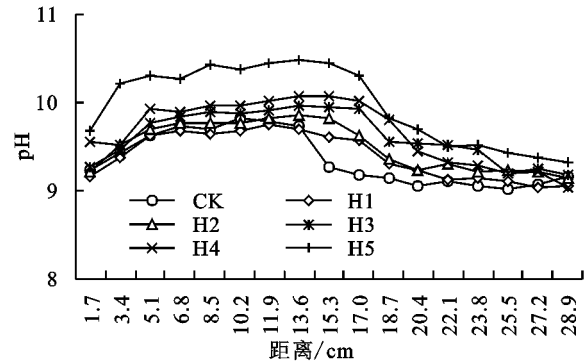


图 4 不同土壤改良剂添加量下土壤 pH 变化

2.5.2 土壤的盐分变化 基于水分扩散率试验研究土壤水平运移方向电导率变化情况,从图 5 可以看出,随着水分在水平方向上的迁移,土壤电导率在 0~18.7 cm 平稳增加,当达到 18.7 cm 以上时,电导率出现拐点,电导率持续上升,意味着土壤盐分在不断增大,说明水平方向上盐分一直在随着水分运动,水分的运动携带盐离子向前推移。从 28.9 cm 这个距离点可以看出,H2、H3、H5 处理较 CK 电导率降低 14%左右,H1、H4 处理较 CK 处理降低 7%左右。从 18.7~28.9 cm 这段距离来看,H3 处理较 CK 降低盐分最大,在 40%左右;H5 处理降低的盐分最小,在 5%左右,说明 3%添加量下,在土壤水平迁移的过程中,电导率降低最为明显,当添加量为 10%时,土壤水平迁移方向上的电导率降低最小。前

人<sup>[20]</sup>研究发现,当生物炭添加量低于 5%时,降低土壤表层返盐率,当生物炭添加量大于 10%时,会加剧表层土壤盐碱化的程度。随着填沙量的增多,土壤盐分逐渐降低<sup>[5]</sup>。本试验在 3%添加量下,最适宜降低土壤水平迁移方向上的电导率。

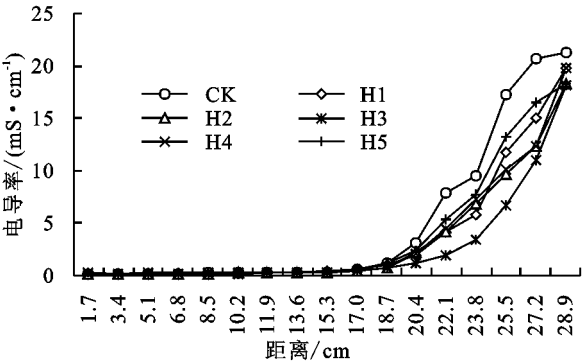


图 5 不同土壤改良剂添加量下土壤电导率变化

3 讨论

絮凝黄河泥沙和生物炭的增加会对土壤的水力特征参数及水盐运移产生影响,刘志凯<sup>[21]</sup>研究发现,随着生物炭添加量的增大,土壤容重减小,孔隙度增加,改善土壤水分特征曲线,提高土壤持水率;陈洋等<sup>[22]</sup>研究发现,随着黄河泥沙的添加量的增多,土壤孔隙度增加,持水量也越来越大。虽单独研究生物炭、黄河泥沙对土壤物理性质的影响,但是结果与本试验生物炭和黄河泥沙复配后改良土壤物理性质一致,也有效提高了土壤的孔隙度,增加土壤的持水性能。针对土壤 pH 和电导率进行分析,贾文慧<sup>[23]</sup>将引黄泥沙添加到黏质土壤中,随着配沙量的增加土壤含盐量不断降低;王桂君等<sup>[24]</sup>研究发现,将生物炭施入土壤中,由于生物炭呈现碱性一定程度上提高了土壤 pH,随着生物炭比例的增加土壤的 pH 不断增大,电导率不断降低;但是张瑞<sup>[25]</sup>认为,生物炭施加能够显著降低土壤的 pH 和电导率,武沛然<sup>[9]</sup>认为,施加生物炭对盐土土壤 pH 降低不明显,几乎没有什么改变。本研究结果在降低土壤电导率结论方面与前人研究结果相似,但是施加生物炭对土壤 pH 的影响表述不同,造成该现象的主要原因是室内试验和大田试验的区别,室内试验生物炭在土壤中的时间短,也不受天气的影响,而大田试验由于生物炭在土壤中的时间较长,既受天气的影响又与原状土壤中复杂的基质有关,所以造成不同试验土壤 pH 变化规律不同。

4 结论

通过絮凝黄河泥沙与生物炭复配对盐碱土改良的试验,分析添加 0,1%,2%,3%,6%,10%的改良剂后盐

碱土水力特征参数(土壤孔隙度及水分含量、土壤水分特征曲线、土壤饱和导水率、土壤水分扩散率)及水平方向上土壤  $EC$ 、 $pH$  分布的规律,得出主要结论为:

(1)土壤孔隙度和土壤水分含量随着絮凝黄河泥沙与生物炭添加量的增大不断增大,10%添加量下较未添加改良剂平均增加 12%,可有效改善盐碱土的土壤结构及根系层水分含量。

(2)分析土壤水分特征曲线发现,在各个压力下改良剂的添加量越多土壤含水率值越大,10%添加量较未添加增大 13%,体现生物炭和絮凝黄河泥沙良好的保水性。

(3)从土壤饱和导水率分析,3%添加量下饱和导水率最大,较未添加增加 68.9%。

(4)通过土壤水平土柱试验,发现改良剂添加量越大,水分扩散的越慢;土壤  $pH$  越大;降低盐分的效果越不明显。3%添加量下土壤盐分降低的较为明显,较未添加改良剂降低 14%左右,且与未添加改良剂的土壤  $pH$  相差不大;水分扩散速率较快,波尔兹曼参数  $\lambda$  较未添加土壤改良剂增加 31.5%。

综合考虑,3%添加量下能够有效的提高土壤饱和导水率、水分扩散率、土壤孔隙度、土壤水分含量,显著降低了土壤盐分含量,对河套灌区盐碱地改良具有重要意义。

参考文献:

[1] 王民哲.内蒙古河套灌区盐碱化耕地改良措施及建议[J].中国水利,2019(15):40-41.

[2] 侯玉明,王刚,王二英,等.河套灌区盐碱土成因、类型及有效的治理改良措施[J].现代农业,2011(1):92-93.

[3] 屈伸,张伟锋,杨少东,等.不同“水梦”无机吸附剂对黄河水泥沙吸附影响与适用性分析[J].灌溉排水学报,2018,37(1):78-84.

[4] 巨红雨,李晓龙,张琛平.秸秆深埋对河套灌区盐碱地的改良效果研究[J].现代农业,2017(12):28-29.

[5] 郑乾坤.配沙改良对滨海粘质盐土水分和物理性质的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2018.

[6] 孔祥清,韦建明,常国伟,等.生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J].大豆科学,2018,37(4):647-651.

[7] Fei Y H, She D L, Gao L, et al. Micro-CT assessment on the soil structure and hydraulic characteristics of saline/sodic soils subjected to short-term amendment[J]. Soil & Tillage Research,2019,193:59-70.

[8] Yang R Y, Zhou C X, Zhu J J, et al. Effects of biochar

application on phreatic water evaporation and water-salt distribution in coastal saline soil[J].Journal of Plant Nutrition,2019,42(10):1243-1253.

[9] 武沛然.生物炭与氮肥配施对盐碱胁迫下甜菜生长及土壤特性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.

[10] 王凡.生物炭与木醋液复配对盐渍化农田作物生长及水土环境影响试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.

[11] 贾利梅,毛伟兵,孙玉霞,等.不同改良材料对粘质盐土物理性状和棉花产量的影响[J].中国农学通报,2017,33(13):81-87.

[12] 周道玮,田雨,王敏玲,等.覆沙改良科尔沁沙地—松辽平原交错区盐碱地与造田技术研究[J].自然资源学报,2011,26(6):910-918.

[13] 田丹.生物炭对不同质地土壤结构及水力特征参数影响试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.

[14] 吴昱,赵雨森,刘慧.不同的生物炭施用量和施用年限对土壤结构性指标的影响[J].水利科学与寒区工程,2019,2(3):5-11.

[15] 包维斌,白一茹,赵云鹏,等.生物炭添加对宁夏中部旱区土壤水分入渗及持水性的影响[J].土壤通报,2018,49(6):1326-1332.

[16] 依艳丽.土壤物理研究法[M].北京:北京大学出版社,2009:146-147.

[17] 吕刚,王磊,卢喜平,等.不同复垦方式排土场砾石对饱和导水率和贮水能力的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1414-1426.

[18] 孙笛.生物炭添加对半干旱区土壤物理性质影响的定位研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.

[19] 李少朋,陈咄圳,周艺艺,等.生物炭施用对滨海盐碱土速效养分和酶活性的影响[J].南方农业学报,2019,50(7):1460-1465.

[20] 许健.生物炭对土壤水盐运移的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.

[21] 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.

[22] 陈洋,王晓彤,梁宇生,等.黄河泥沙复配土壤水分特征曲线分析[J].煤炭技术,2018,37(10):26-28.

[23] 贾文慧.配沙对粘质盐土水分特性的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2019.

[24] 王桂君,许振文,田晓露,等.生物炭对盐碱化土壤理化性质及小麦幼苗生长的影响[J].江苏农业科学,2013,41(12):390-393.

[25] 张瑞.生物炭对滨海盐碱土理化特性和小白菜生长的影响研究[D].上海:上海交通大学,2015.