

不同改良剂对河套灌区盐碱土入渗特性及水盐分布的影响

李淑芹¹, 刘宇轩¹, 张美桃^{1,2}, 江冰冰¹, 魏琛琛^{1,3}, 苏艳平¹, 曾祥³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 乌兰察布市水利事业发展中心, 内蒙古 乌兰察布 012000; 3. 长江科学院农业水利研究所, 武汉 430010)

摘要: 为对比研究改良剂对河套灌区盐碱土入渗特性及水盐分布的影响, 设置对照组及 2 种施用水平(1% 和 2%) 下的 2 种改良剂(生物炭和脱硫石膏)共 5 组处理, 进行室内土柱试验。结果表明:(1) 相比于对照组, 1% 施用量的生物炭能使入渗时间延缓 8.9%, 抑制水分入渗, 降低相同时间内的土壤累积入渗量, 2% 施用量的生物炭对水分入渗过程起到先抑制后促进的作用, 能使入渗时间缩短 35.6%, 2 种施用量的脱硫石膏都能使入渗时间缩短 91.1%, 促进水分入渗, 提高相同时间内的累积入渗量; 只有 2% 施用量的生物炭使最终的累积入渗量大幅增加 62.8%。(2) 湿润锋运移距离与时间呈幂函数关系, 用 Kostiakov 模型对累积入渗量和时间的关系拟合相对于 Philip 模型效果更好。(3) 相比于对照组, 只有 1% 施用量的生物炭使入渗后的土壤含水率降低 2.7%, 其余各处理均出现不同程度的增加; 2 种施用量的生物炭分别使入渗后的土壤含盐量显著降低 28.5% 和 52.0%, 但 2 种施用量的脱硫石膏分别使土壤表层含盐量显著提高 184.3% 和 403.7%, 其中 2% 施用量处理使土壤整体平均含盐量显著提高 73.0%。综合考虑各处理改良后的入渗特性、土壤含水率和脱盐效果, 2% 施用量的生物炭更适用于河套灌区的盐碱土改良。

关键词: 河套灌区; 盐碱土; 生物炭; 脱硫石膏; 入渗模型; 水盐分布

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0296-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.038

Effects of Different Amendments on Infiltration Characteristics and Soil Water and Salt Distribution of Saline-alkali Soil in Hetao Irrigation District

LI Shuqin¹, LIU Yuxuan¹, ZHANG Meitao^{1,2}, JIANG Bingbing¹,

WEI Chenchen^{1,3}, SU Yanping¹, ZENG Xiang³

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083;

2. Ulanqab Development Center of Water Conservancy, Ulanqab, Inner Mongolia 012000;

3. Agricultural Water Conservancy Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract: In order to study the effect of amendments on infiltration characteristics and water and salt distribution of saline-alkali soil in Hetao Irrigation District, soil column experiment was carried out under five experimental conditions: control group and two contents (1% and 2%) of two modifiers (biochar and desulfurized gypsum). The results showed that: (1) Compared to the control group, 1% biochar made the infiltration time delay 8.9%, inhibited water infiltration, and reduced the amount of cumulative infiltration on the same time, while 2% biochar firstly inhibited and then promoted the process of infiltration, and it made the infiltration time shortened by 35.6%. Both desulfurized gypsum made the infiltration time shortened by 91.1%. They effectively promoted water infiltration and increased the amount of cumulative infiltration on the same time; Only 2% biochar significantly increased the final cumulative infiltration by 62.7%. (2) There was a power function relationship between the migration distance of wet front and time. Kostiakov model described the relationship between cumulative infiltration and time better than Philip model. (3) Compared to the control group, only 1% biochar reduced the soil moisture content by 2.7% after

收稿日期: 2022-05-15

资助项目: 北京市大学生创新创业训练计划项目(S202110019163); 国家重点研发计划项目(2021YFD1900600); 国家自然科学基金项目(51909265); 科技兴蒙项目(2021CG0013)

第一作者: 李淑芹(1965—), 女, 副教授, 主要从事水水土保持与生态小流域治理研究。E-mail: lishuqin@cau.edu.cn

通信作者: 李淑芹(1965—), 女, 副教授, 主要从事水水土保持与生态小流域治理研究。E-mail: lishuqin@cau.edu.cn

infiltration, while the other treatments had varying degrees of increase. The two application rates of biochar significantly reduced the soil salt content by 28.5% and 52.0%, respectively. However, the two contents of desulfurized gypsum significantly increased the soil surface salt content by 184.3% and 403.7%, respectively. The 2% application rate significantly increased the overall average soil salt content by 73.0%. By comprehensive consideration of the infiltration characteristics, soil moisture content and desalting effect of each treatment, biochar under the content of 2% is more suitable to improve saline-alkali soil in Hetao Irrigation District.

Keywords: Hetao Irrigation District; saline-alkali soil; biochar; desulfurization gypsum; infiltration model; soil water and salt distribution

随着我国社会经济的发展,灌区对水资源的需求日益增加。河套灌区作为我国 3 个特大型灌区之一,是重要的商品粮生产基地,其总用水量中 90% 以上为农作物生产用水^[1]。国家节水改造工程实施以来,河套灌区年均引水量从 $5.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 减至 $4 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[2],灌区水资源短缺现象更加严峻。与此同时,长期不合理的灌溉加上较高的蒸降比使得当地土壤盐碱化和次生盐碱化严重,灌区内以硫酸盐化土、氯化物盐化土、苏打盐化土和碱化土为主的盐碱土分布广泛^[3],总面积约占当地总土地面积的 69%^[4],河套灌区因此出现大量的耕地废弃,盐荒地面积逐年增加。由此可见,水资源短缺及土壤盐碱化 2 个问题严重制约当地农业的发展^[5],加快保护河套灌区的水土资源已刻不容缓。

入渗是研究土壤中水分及溶质迁移的重要理论^[6],可以在一定程度上影响水资源的利用程度,解决土壤中因溶质浓度过高带来的一系列问题。因此,采取措施改善土壤水分入渗能力,是促进河套灌区农业可持续发展的有效途径。其中,利用改良剂改良土壤既能提高土壤的持水能力,还能在一定程度上减轻土壤盐碱化程度^[7-11],是契合河套灌区水土资源保护的改善方法。生物炭和脱硫石膏作为常用的土壤改良剂^[12-13],具有价格低廉、来源广泛、绿色环保等特点,兼顾经济、社会、生态多方面效应^[14],在改良盐碱土方面具有很大的潜力^[15-16],因此得到各国学者的广泛应用。

生物炭是一种高度芳香化且不易熔的固态物质,由生物质材料在高温和无氧或缺氧条件下通过热解炭化形成^[17]。由于生物炭能改善土壤容重、孔隙度和粒径组成,具有增强土壤透水性、提高土壤持水能力的特点^[18-19],因此能对盐碱土中入渗过程产生直接或间接的影响。高言等^[20]在研究 6 种生物炭添加量对土壤水分入渗的影响时发现,生物炭的添加降低土壤的最终累积入渗量,且随着生物炭添加量的增大,湿润锋运移进程减缓效果越发明显;刘淙琮等^[21]通过研究不同添加量的生物炭对滨海盐碱土咸水入渗特征的影响时发现,随着生物炭添加量的增大,湿润锋运移时间变短,入渗速率变快,并且生物炭的施加

增大入渗后的土壤含水量,使土壤表层盐分向下运移;Cui 等^[22]研究表明,生物炭可以改善盐碱土的性质,提高土壤持水能力,降低土壤盐浓度。由此可见,生物炭在不同施用量下对土壤的入渗特性和水盐分布产生的影响不同,针对不同土壤,生物炭对水分入渗存在促进或抑制 2 种相反的作用,且目前在改良盐碱土的相关研究中,利用生物炭和其他改良剂的对比研究相对较少。

脱硫石膏是对含硫燃料(煤、油等)燃烧后产生的烟气脱硫净化处理后得到的工业副产石膏,其主要成分为 CaSO_4 和 CaSO_3 ^[23]。利用脱硫石膏改良土壤始于 20 世纪 90 年代,且研究对象主要是酸性土壤,而其对碱性土壤的改良研究仍处于探索阶段^[24]。脱硫石膏改良盐碱土的原理是通过脱硫石膏中 Ca^{2+} 与土壤中 Na^+ 的交换^[25],从而改善盐碱土的结构和电导率,增加土壤透水性^[26]。Zhao 等^[27]研究 4 种施用量的脱硫石膏对内蒙古地区盐碱土理化性质的影响发现,脱硫石膏的加入显著提高土壤电导率;徐文硕等^[28]研究 5 种脱硫石膏施用量对滨海盐碱土水分入渗能力的影响,结果表明,脱硫石膏在 5% 掺加比时可明显促进滨海地区盐碱土中水分运移;杜学军等^[29]研究脱硫石膏对苏打盐碱土水盐入渗过程的影响时发现,脱硫石膏的加入提高苏打盐碱土水分入渗速率,增加脱盐效率,其中 1.5% 和 2% 施用量对苏打盐碱土改良有较好的效果。由此可见,脱硫石膏在改良盐碱土方面的研究主要集中在其不同施用量尺度上,施用后对土壤中水分入渗多产生促进作用,但其在不同类型土壤中脱盐效果不同,且相关研究较少。

上述学者的研究表明,生物炭和脱硫石膏都可作为盐碱土改良剂,目前二者改良各个地区盐碱土的研究已经取得很大进展,但缺少针对河套灌区中度盐碱土的改良研究,以及二者在不同施用量时对该地区中度盐碱土水分入渗和水盐分布改良效果的对比分析。因此,本研究通过室内土柱试验模拟一维定水头垂直入渗过程,通过湿润锋运移距离、累积入渗量、土壤含水率和土壤含盐量等特征量探究生物炭和脱硫石膏在不同施用量时对河套灌区中度盐碱土入渗特性和水盐分布的

影响,并对比评价 Kostikov 模型和 Philip 模型的适用性,旨在找出较为合适的改良剂及施用量,为河套灌区盐碱土的改良提供科学依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区曙光实验站(40°46'N,107°24'E)春玉米农田 5 g/L 微咸水灌溉 3 年后处理的 0—20 cm 耕层,采用“S”形取样法进行取土,土壤取回后自然风干过 2 mm 筛,去除肉眼可见的根系与杂质后放置于阴凉通风处。土壤为粉砂壤土(黏粒,粉粒,砂粒的含量分别为 7.69%,62.38%,29.93%),容重为 1.4 g/cm³,电导率为 0.903 mS/cm,pH 为 8.15。土壤铵态氮含量 5.08 mg/kg,硝态氮含量 9.12 mg/kg,全氮含量 0.49 g/kg,有机质含量 9.58 g/kg。

供试生物炭来自于辽宁金和福农业开发有限公司,以玉米秸秆为原料,在 450~600 °C 下进行热解制备,粉碎过 5 mm 筛,混合均匀备用,其 pH 为 8.86。供试脱硫石膏为内蒙古包头市某电热厂脱硫废弃石膏,pH 为 6.93,其主要成分是 CaSO₄ · 2H₂O,CaSO₄ 含量 > 85%。

表 1 土壤盐渍化程度划分标准

土层 深度/cm	轻度盐渍土		中度盐渍土		重度盐渍土	
	全盐量/%	电导率/ (mS · cm ⁻¹)	全盐量/%	电导率/ (mS · cm ⁻¹)	全盐量/%	电导率/ (mS · cm ⁻¹)
0—20	0.20~0.40	0.70~1.24	0.40~0.60	1.24~1.77	0.60~1.00	1.77~2.85
20—100	0.15~0.18	0.57~0.65	0.22~0.79	0.76~0.94	0.40~0.65	1.24~1.92

土柱封装完成后,采用内径 7 cm,高 50 cm 的马氏瓶供水,进行土壤入渗试验。土柱中的水头高度控制在 2 cm,并用保鲜膜及橡皮筋封住土柱顶端,扎几个小孔进行透气,以尽量减小蒸发对入渗试验的影响。土柱和马氏瓶侧面均贴有带刻度的塑料透明标尺,入渗过程中,定时记录湿润锋的运移距离和马氏瓶的水位刻度,以分析入渗特性,湿润锋到达土柱底部时,入渗过程结束。入渗结束后,待土柱静置 24 h 后,分层取出足量土样,测定水分及盐分含量以明确土壤水盐分布规律。试验装置示意图 1。

1.3 测定项目与方法

累积入渗量的测定:记录试验初始和不同入渗时间的马氏瓶水位高度,换算得累积入渗量,换算公式为:

$$I(t) = A_1(H_1 - H_2) / A_2 \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为土壤入渗累积入渗量(cm); A_1 和 A_2 分别为马氏瓶和土柱的横截面积(cm²); H_1 和 H_2 分别为马氏瓶中相应入渗时间的水位高度和初始水位高度(cm)。

1.2 试验设计

室内试验于 2021 年 10 月在中国农业大学水利与土木工程学院土壤物理与作物学基础实验室进行。以河套灌区广泛分布的中度盐碱土为例进行试验。根据表 1 土壤盐渍化程度划分标准^[30]将取自大田的土壤定位为轻度盐碱土,试验开始前,在所取土样中添加 NaCl 实现中度盐碱土的配制(1.67 mS/cm)。生物炭与脱硫石膏分别按照与干土质量百分比为 1% 和 2% 的添加比例与土壤进行均匀混合,各添加比例分别相当于 15,30 t/hm² 的田间试验施用量。试验设置 5 个处理:中度盐碱土(CK)、中度盐碱土添加 1% 生物炭(B1)、中度盐碱土添加 2% 生物炭(B2)、中度盐碱土添加 1% 脱硫石膏(G1)、中度盐碱土添加 2% 脱硫石膏(G2),每组处理设 3 个重复。室内设置土柱模拟试验,土柱是内径为 9 cm,高度为 60 cm 的透明有机玻璃柱,装土高度为 40 cm。开始试验前在土柱内侧涂抹凡士林以防止管壁效应,在土柱底部放置 1 层滤纸及 200 目的尼龙网,底部填入 5 cm 的用酸洗过的石英砂,生物炭和脱硫石膏与 0—20 cm 土层的土壤混合,根据 1.4 g/cm³ 的土壤容重每层 5 cm 封装土柱,并将各土层分层界面打毛。

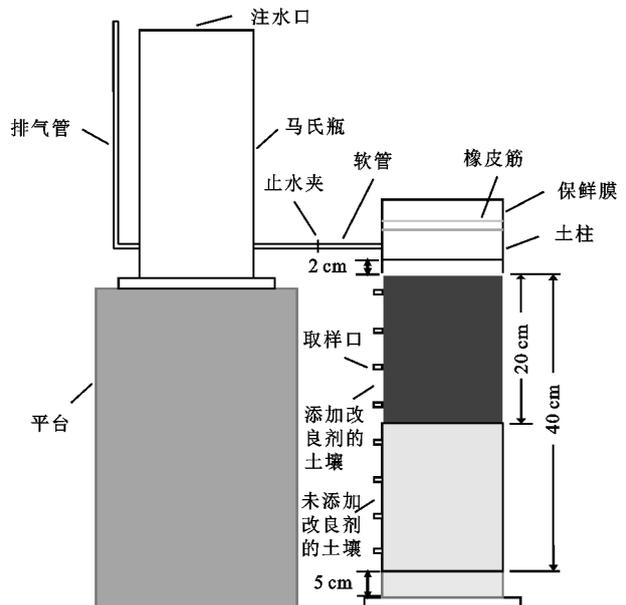


图 1 试验装置示意

湿润锋运移距离的测定:入渗试验开始时,按照“先密后疏”的原则^[31],在透明标尺上读取数据并计算相应时间湿润锋运移距离。试验过程中,每次在土

柱上选取 4 个方向分别读取湿润锋运移距离并取其平均值作为最终湿润锋运移距离。当湿润锋运移距离达到 40 cm 时,入渗过程结束,停止记录。

土壤含水率的测定:用烘干法测定质量含水率。

土壤含盐量的测定:称取 10 g 风干土按照水土比 5 : 1 加入 50 mL 去离子水,在恒温振荡器内以 180 r/min 转速振荡 30 min 后,用校准后的多参数仪(SG23 型)测定电导率(EC),再将电导率转化为含盐量,具体转化公式为^[32]:

$$z = 2.160EC + 0.303 \quad (2)$$

式中: z 为土壤含盐量(g/kg); EC 为 25 °C 下水土比 5 : 1 时土壤浸提液的电导率值(mS/cm)。

1.4 入渗模型

为了评估不同生物炭及脱硫石膏施用量条件下入渗模型的适用性,本文选取 Kostiakov 模型和 Philip 模型模拟土壤水分入渗过程:

(1)Kostiakov 入渗模型公式为:

$$I(t) = Kt^n \quad (3)$$

式中: $I(t)$ 为土壤入渗累积入渗量(cm); K 为入渗经验系数; n 为入渗指数; t 为入渗时间(min)。

(2)Philip 入渗模型公式为:

$$I(t) = St^{0.5} + At \quad (4)$$

式中: $I(t)$ 为土壤入渗累积入渗量(cm); S 为土壤吸渗率(cm/min^{0.5}); A 为稳定入渗率(cm/min); t 为入渗时间(min)。

1.5 数据处理

所用数据均为 3 次重复的平均值,试验数据的统计分析均在 Excel 2021 和 SPSS 13.0 统计软件中进行,通过 Excel 2021 软件对土壤入渗特征量和水盐分布规律进行数据分析及绘图,在 SPSS 13.0 软件中采用单因素方差分析法对不同处理方式的数据进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂处理对湿润锋运移的影响

湿润锋是入渗过程中明显的干土和湿土交界面^[33],能直观反映重力作用下的土壤水分运动特征,各处理的湿润锋运移特征。由图 2 可知,总体来说,各处理的湿润锋运移距离随时间延长而增大,运移进程随湿润锋运移距离的增加呈现出减缓的趋势,但各处理的运移情况随时间变化特征有所不同。CK、B1、B2、G1 和 G2 处理的湿润锋到达土柱底部所用时间分别为 8 100,8 820,5 220,720,720 min,B1 处理相比 CK 处理增加 8.9%,B2 处理相比 CK 处理缩短 35.6%,G1 和 G2 处理相比 CK 处理都缩短 91.1%。当入渗时间为 720 min 时,CK、B2、G1 和 G2 处理的

湿润锋运移距离分别为 17.35,17.68,40,40 cm,B2、G1 和 G2 处理相对于 CK 处理分别增加 1.9%,130.5% 和 130.5%,此时 G1 和 G2 处理的湿润锋已经运移到土柱底端,二者对土壤水分下移有明显的促进作用。B2 处理和 CK 处理在 720 min 之前的湿润锋运移距离变化曲线基本相似,当入渗时间在 720 min 后,B2 处理较 CK 处理明显促进湿润锋运移进程。这表明,脱硫石膏在 1% 和 2% 的添加量下均能极大促进水分下渗,且 2 种施用量之间不存在明显差异,2% 添加量的生物炭在入渗前期对湿润锋下移过程抑制作用不大,但在入渗后期起到一定的促进作用,这一转变大致发生在炭土混合层和土层的分界处。从整体来看,相同时间内,B1 处理的湿润锋运移距离基本在整个入渗过程中都远小于 CK 处理,这说明生物炭在 1% 添加量时抑制盐碱土中水分下移。

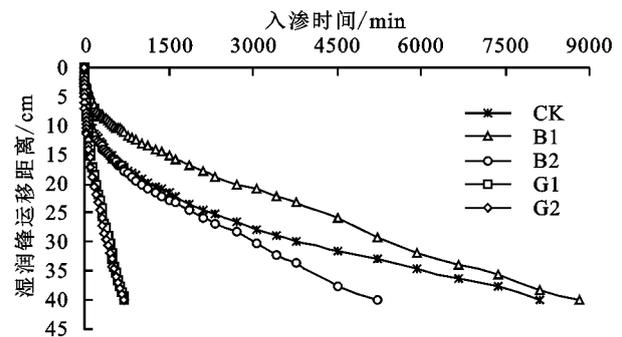


图 2 添加不同改良剂对湿润锋运移距离的影响

进一步对湿润锋运移距离与时间的关系进行拟合发现,二者符合幂函数的关系,其表达式为:

$$H = at^b \quad (5)$$

式中: H 为湿润锋运移距离(cm); t 为入渗时间(cm); a 、 b 为入渗的经验常数^[34]。

由表 2 可知,幂函数很好地模拟不同改良剂条件下盐碱土的湿润锋运移规律,模拟决定系数(R^2)均大于 0.98。

表 2 添加不同改良剂湿润锋运移距离与入渗时间的关系

处理	$H = at^b$		R^2
	a	b	
CK	1.7445	0.3487	0.9984
B1	0.7361	0.4194	0.9853
B2	1.6589	0.3654	0.9926
G1	0.7847	0.6025	0.9989
G2	2.0259	0.4503	0.9984

2.2 不同改良剂处理对累积入渗量的影响

累积入渗量是入渗过程中通过土柱单位面积的水位变化高度,土壤入渗过程达到稳定前常用累积入渗量来表示土壤入渗性能^[35]。由图 3 可知,随着时间的推移,各处理的累积入渗量增加幅度均呈现逐渐减小的规律,而不同改良剂对土壤最终累积入渗量的

影响各不相同。入渗时间 <120 min 时,各改良剂的添加都能减小土壤的累积入渗量。入渗时间在 120 min 后,相同时间内 G1 和 G2 处理的累积入渗量高于 CK 处理,且在 720 min 时达到最大,但最终累积入渗量与 CK 处理相似,且二者的作用效果无明显差异。然而在 120~720 min 阶段,相同时间内 B1 和 B2 处理的累积入渗量仍低于 CK 处理。在 3 420 min 时,CK、B1 和 B2 处理的累积入渗量分别为 11.10, 8.05, 19.76 cm, B1 处理相对于 CK 处理减少 27.5%, B2 处理相对于 CK 处理增加 78.0%, 可见入渗后期 B1 处理的累积入渗量仍低于 CK 处理,而 B2 处理的累积入渗量较 CK 处理有大幅增加。这表明,1% 和 2% 添加量的脱硫石膏都能加快水分的入渗速度,1% 添加量的生物炭使水分的下移过程受到抑制,而 2% 添加量的生物炭在入渗初期抑制水分入渗,入渗后期明显促进水分入渗的过程。在入渗结束时,CK、B1、B2、G1 和 G2 处理的累积入渗量分别为 14.50, 14.19, 23.60, 14.78, 14.19 cm, 其中 B2 较 CK 处理的最终累积入渗量增加 62.8%, 这表明,2% 添加量的生物炭能明显增加土壤的累积入渗量,其余处理对最终入渗量影响不大。

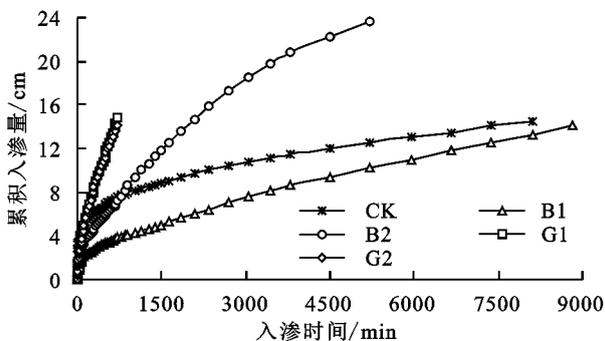


图 3 添加不同改良剂对累积入渗量的影响

2.3 不同改良剂处理下湿润锋运移与累积入渗量的关系

湿润锋运移距离受累积入渗量和入渗率的共同影响^[36],土壤累积入渗量和湿润锋运移距离都能用时间的幂函数表示^[37],二者随入渗时间变化的趋势基本相同,由此推断二者符合线性关系,为了定量分析两者关系,利用线性方程进行拟合:

$$H=cI+d \quad (6)$$

式中: H 为湿润锋运移距离(cm); I 为累积入渗量(cm); c 、 d 为拟合参数。

由表 3 可知,各组的决定系数(R^2)均大于 0.96, CK、B1、G1、G2 处理的决定系数(R^2)在 0.99 以上。各处理 a 值均大于 0,且除 B2 处理外,各处理的拟合参数(c)值波动范围在 2.67~3.06,曲线斜率较为接

近,这说明湿润锋运移距离与累积入渗量之间存在良好的正相关线性关系,各处理的土层密实度相近。B2 处理的拟合效果相对较差,是因为生物炭的用量大,改变上层土壤的孔隙结构,从而影响湿润锋运移距离与累积入渗量之间存在的线性关系。

表 3 不同改良剂处理下湿润锋运移距离与累积入渗量的关系

处理	$H=cI+d$		
	c	d	R^2
CK	3.0538	-5.3275	0.9968
B1	2.8669	-0.0415	0.9955
B2	1.4935	4.8654	0.9637
G1	2.6791	1.4358	0.9992
G2	2.6958	42.8725	0.9944

2.4 不同改良剂处理下入渗模型拟合分析

已有学者^[38]提出若干种数学模型来拟合土壤中水分入渗过程,各种入渗模型都有不同的适用性。为进一步研究改良剂对入渗参数的影响,本研究分别采用 Kostiakov 公式和 Philip 公式对土壤累积入渗量和入渗时间之间的关系进行拟合分析,拟合结果见表 4。

表 4 2 种入渗公式参数拟合结果

处理	Kostiakov 公式			Philip 公式		
	k	n	R^2	S	A	R^2
CK	1.6980	0.2287	0.9912	0.3445	-0.0023	0.9514
B1	0.2436	0.4287	0.9820	0.1392	0.0001	0.9917
B2	0.2238	0.5434	0.9933	0.2540	0.0013	0.9957
G1	0.0976	0.7866	0.9910	0.3298	0.0084	0.9973
G2	0.3511	0.5582	0.9977	0.3879	0.0055	0.9988

利用 Kostiakov 公式拟合不同处理盐碱土入渗过程,其决定系数(R^2)均在 0.98 以上,拟合效果较好,公式中 K 值为第 1 个单位时间末的入渗速度, n 大小主要取决于因土壤含水率引起的土壤基质势变化,随着土壤含水率的增加,土壤基质势衰减速度越慢, n 值越大。 K 值大小关系为 $CK>G2>B1>B2>G1$, n 值大小关系为 $G1>G2>B2>B1>CK$,可见添加改良剂后 K 值均小于 CK 处理, n 值均大于 CK 处理,这说明改良剂能使土壤结构发生变化,也能使累积入渗量的衰减程度降低,影响水分的入渗过程。

Philip 公式拟合结果中,除 CK 处理的决定系数(R^2)为 0.95 外,其余各处理的决定系数(R^2)都大于 0.99,拟合效果良好。公式中的 S 为吸渗率,反映土壤前期的入渗能力,添加生物炭会使吸渗率降低,添加脱硫石膏对吸渗率影响较小,因而出现入渗初期 B1 和 B2 处理抑制水分的入渗过程,而 G1 和 G2 处理对水分入渗的促进作用不明显的现象。 A 为稳渗率,即土壤达到饱和的入渗速率,施加改良剂后的稳渗率均大于 CK 处理,说明施用改良剂能增强土壤后

期的渗透性能,G1 和 G2 处理的饱和入渗速率明显大于 B1 和 B2 处理,这是脱硫石膏与生物炭处理后入渗时间存在差异的原因。但 CK 处理的值为负数,与实际不符,表明 Philip 模型不适用于河套灌区盐碱土水分入渗过程的模拟。

2.5 不同改良剂处理对入渗后土壤含水率的影响

图 4 为入渗结束后不同处理各土层土壤含水率的变化情况。5 种处理的土柱在入渗后土壤上层含水率均大于底层含水率。在 0—20 cm 土层,各处理的土壤含水率分布规律相似,均随土层深度增大呈现缓慢降低的趋势,CK、B1、B2、G1 和 G2 处理的平均含水率分别为 21.0%,20.7%,21.7%,21.1%,21.5%,各处理无显著性差异($p>0.05$)。在 20—40 cm 土层,施加生物炭的土壤含水率变化与 0—20 cm 土层不同,CK、B1、B2、G1 和 G2 处理的平均含水率分别为 16.6%,16.0%,18.8%,20.3%,20.8%,可见,G1 和 G2 处理能显著提高土壤底层的含水率($p<0.05$)。CK、B1、B2、G1 和 G2 处理的土壤整体平均含水率分别为 18.8%,18.3%,20.2%,20.7%,21.2%。总体而言,只有 B1 处理入渗后土壤整体平均含水率较 CK 处理下降 2.7%,其余处理分别较 CK 处理提高 7.4%,10.1%,12.8%。

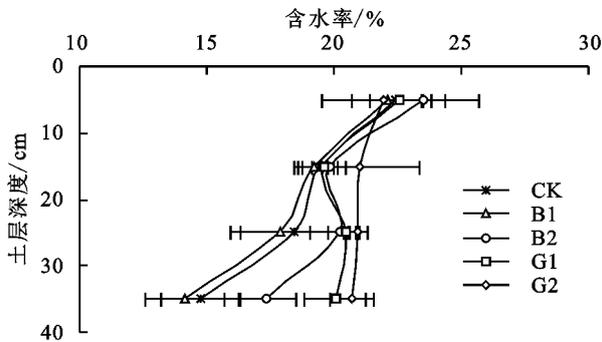


图 4 添加不同改良剂各土层含水率变化

2.6 不同改良剂处理对入渗后土壤含盐量的影响

土壤含盐量是盐碱土限制作物生长的重要因素。图 5 为入渗结束后不同处理各土层土壤含盐量的变化规律,图中无图例符号的实线表示土壤初始含盐量(3.91 g/kg)。在 0—20 cm 土层,CK、B1、B2、G1 和 G2 处理的土壤平均含盐量分别为 1.08,1.10,1.07,3.07,5.44 g/kg,B1 和 B2 处理与 CK 处理无显著性差异($p>0.05$),G1 和 G2 处理分别较 CK 处理显著提高 184.3%和 403.7%($p<0.05$)。在 20—40 cm 土层,CK、B1、B2、G1 和 G2 处理的土壤平均含盐量分别为 4.54,2.92,1.63,2.73,4.27 g/kg,B1、B2、G1 和 G2 处理较 CK 处理分别减小 35.7%,64.1%,39.9%和 5.9%,这说明 2 种施用量的生物炭和脱硫石膏都能降低土壤深层含盐量。B1 和 B2 处理的土壤整体

平均含盐量分别为 2.01,1.35 g/kg,较 CK 处理的土壤整体平均含盐量(2.81 g/kg)分别显著降低 28.5%和 52.0%($p<0.05$)。由此可见,生物炭能提高盐碱土的脱盐效率,且 2%的生物炭添加量脱盐效果更显著。G1 和 G2 处理的土壤整体平均含盐量分别为 2.90,4.86 g/kg,较 CK 处理的土壤整体平均含盐量(2.81 g/kg)分别提高显著 3.2%和 73.0%($p<0.05$),因此施用脱硫石膏改良盐碱土时需控制好剂量,以免出现土壤盐渍化加重的现象。

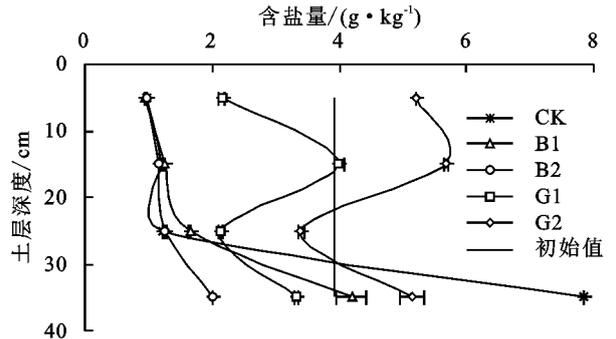


图 5 添加不同改良剂各土层含盐量变化

3 讨论

本研究发现,生物炭用量对土壤水分入渗的影响存在差异性。添加 1%生物炭能减缓湿润锋的运移速率,并且降低最终累积入渗量,这与李帅霖等^[39]研究的耕层添加 1%施用量的生物炭条件下所得结论较为一致,1%的添加量相对较少,其多孔结构的亲水功能体现不明显,但能使土壤的中孔数量减少,降低有效孔隙,加之土壤中炭土混合层和土层界面也存在毛管障碍,影响毛管连通性,这可能是导致水分的入渗受到抑制的原因^[40]。而添加 2%生物炭大幅提高入渗后期的湿润锋运移速率,明显增大土壤最终累积入渗量,这一点与李帅霖等^[39]和马贵等^[41]的研究结论并不一致,原因可能是土壤类型和所用生物炭原料来源不同,从而导致已有研究^[39,41]中当生物炭添加量增大时,土壤中的水流通孔隙被堵,土壤水分入渗能力下降,而本研究中当生物炭用量增加到 2%时,土层结构发生改变,炭土混合层和土层分界面下方的土壤进水吸力大于上方^[42],此处的基质吸力突增,并且大量生物炭的施用能增加土壤有效孔隙和过水断面面积,总体作用大于分界面处的毛管障碍作用对水分入渗的影响,起到促进水分的入渗速率,增大水分的入渗量的效果,这也是入渗模型拟合结果中 B2 处理的稳渗率大于 B1 处理的原因所在。添加 1%和 2%生物炭处理入渗后的土壤含水率变化情况和生物炭施加后形成 2 种土层结构的不同水分入渗能力有关。生物炭的施入使土壤含盐量有效减少,

这与 Zhang 等^[43] 和 Duan 等^[44] 的研究结果较为一致,这是由于生物炭的吸附能力强,土壤中的盐离子被吸附到其表面或孔洞中,使得在入渗后土壤的脱盐效率得到提高^[8]。

脱硫石膏在 1% 和 2% 的施用量下都能增大入渗速率,提高土壤平均含水率,王雪等^[45] 研究表明,石膏处理提高盐碱土的入渗能力。这是因为脱硫石膏中的 Ca^{2+} 能将盐碱土中的 Na^+ 置换出来,改善土壤团粒结构,含 Na^+ 胶粒亲水,而含 Ca^{2+} 胶粒疏水,土壤的透水性能增大^[46],且试验所用盐碱土的机械组成中以粉土为主,在加入脱硫石膏后能改变土壤粒径级配^[28],从而加速水分的下移速率,导致入渗模型拟合结果中 G1 和 G2 处理的稳渗率明显大于其他处理。脱硫石膏的施用使得入渗后的土壤含盐量增大,这与已有研究^[47-50] 的结论一致,这是由于石膏中的可溶性盐分较多,导致施加脱硫石膏的土层土壤中水溶性盐含量增加,水分入渗过程只能使其中一部分盐分被淋洗,故而使土壤上层出现含盐量增大的现象。

4 结论

(1) 相比于对照组,1% 和 2% 添加量的脱硫石膏能有效促进湿润锋下移进程,提高相同入渗时间下的累积入渗量,1% 添加量的生物炭能减缓湿润锋下移过程,降低相同入渗时间下的累积入渗量,2% 添加量的生物炭对累积入渗量有先抑制后促进的影响;4 组处理中只有 2% 添加量的生物炭使最终的累积入渗量大幅增加,其余各处理对此无明显影响。

(2) 不同施用量的生物炭和脱硫石膏改良条件下土壤湿润锋运移距离与时间符合幂函数关系;Kostiakov 入渗模型能较好地拟合累积入渗量和时间的关系,模拟效果好于 Philip 模型。

(3) 相比于对照组,只有 1% 施用量的生物炭使入渗后的土壤含水率降低 2.7%,其余各处理分别使土壤含水率增加 7.4%,10.1%,12.8%;1% 和 2% 施用量的生物炭分别使土壤整体含盐量显著降低 28.5%,52.0%,2% 施用量处理下的脱盐效果更显著,而 1% 和 2% 施用量的脱硫石膏使土壤整体平均含盐量分别显著提高 3.2%,73.0%,使土壤 0—20 cm 土层含盐量分别显著提高 184.3%,403.7%。

综合对比 5 种处理的入渗特性、入渗后的土壤含水率及脱盐效果,2% 施用量的生物炭更适用于河套灌区的盐碱土改良。本研究初步讨论不同施加量的生物炭和脱硫石膏对河套灌区盐碱土水分入渗特性及水盐分布的影响,但试验条件与田间情况有所差异,所得结论有待进一步开展实践验证。

参考文献:

- [1] 刘静.近 50 年来河套灌区作物虚拟水流动演变过程与可持续性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [2] 王国帅,史海滨,李仙岳,等.河套灌区耕地—荒地—海子系统间不同类型水分运移转化[J].水科学进展,2020,31(6):832-842.
- [3] 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.
- [4] 黄权中,徐旭,吕玲娇,等.基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J].农业工程学报,2018,34(1):102-109.
- [5] 陶健宇,杨劲松,姚荣江,等.河套灌区土壤盐分对化肥氮素转化过程的影响研究[J].土壤,2020,52(4):802-810.
- [6] 王春霞,王全九,吕廷波,等.添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(1):31-35.
- [7] 马晨光.腐殖酸和羧甲基纤维素对滨海盐碱地水盐分布与冬小麦生长的影响[D].西安:西安理工大学,2021.
- [8] 刘国欢.改性生物炭对盐碱地改良及冬小麦生长特征影响的研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [9] 徐璐.耕作及石膏对苏打盐碱土改良作用研究[D].北京:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2012.
- [10] 张宇航,高佩玲,张晴雯,等.中度盐碱土掺沙对土壤水盐运移和夏玉米生长的影响[J].中国土壤与肥料,2019(2):83-90.
- [11] Murtaza G, Murtaza B, Kahlon U Z, et al. A comparative study of different amendments on amelioration of saline-sodic soils irrigated with water having different EC: SAR ratios [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(22): 2630-2641.
- [12] 侯林.脱硫石膏与腐植酸改良盐碱土室内土柱研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [13] 王世斌,高佩玲,相龙康,等.生物炭、河沙对盐碱土水盐、氮素及玉米产量的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(9):17-23.
- [14] 赵永敢,王淑娟,李彦,等.脱硫石膏改良盐碱土技术发展历程与展望[J].清华大学学报(自然科学版),2022,62(4):735-745.
- [15] 刘森,王志春,杨福,等.生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J].水土保持学报,2021,35(3):1-8.
- [16] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 121: 82-92.
- [17] 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.
- [18] 许健,牛文全,李元,等.生物炭对微润灌土壤水分运动

- 的影响[J].节水灌溉,2015(12):64-68.
- [19] Kumari K G I D, Per M, Marcos P, et al. Effects of biochar on air and water permeability and colloid and phosphorus leaching in soils from a natural calcium carbonate gradient[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(2):647-657.
- [20] 高言,沈洪政,杨婷,等.不同生物炭添加量对土壤水分运动过程的影响及模拟研究[J].中国农村水利水电,2021(9):134-140.
- [21] 刘淙琮,董心亮,郭凯,等.桉柳生物炭对滨海盐渍土咸水入渗特征的影响研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(3):1194-1202.
- [22] Cui L Q, Liu Y M, Yan J L, et al. Revitalizing coastal saline-alkali soil with biochar application for improved crop growth[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 179: e106594.
- [23] 唐珧,张强,王斌,等.脱硫石膏改良重度苏打盐化土的环境效应[J].水土保持学报,2017,31(2):317-321.
- [24] 黄晓明.脱硫石膏对碱化土壤改良的研究[D].天津:天津科技大学,2009.
- [25] Oster J D. Gypsum usage in irrigated agriculture: A review[J]. *Fertilizer Research*, 1982, 3(1):73-89.
- [26] 秦萍,张俊华,孙兆军,等.土壤结构改良剂对重度碱化盐土的改良效果[J].土壤通报,2019,50(2):414-421.
- [27] Zhao Y G, Zhang W C, Wang S J, et al. Effects of soil moisture on the reclamation of sodic soil by flue gas desulfurization gypsum [J]. *Geoderma*, 2020, 375: e114485.
- [28] 徐文硕,李克升,孔维航,等.脱硫石膏施用量对滨海盐碱土水分运移的影响[J].人民黄河,2021,43(9):110-114.
- [29] 杜学军,闫彬伟,许紫峻,等.脱硫石膏对苏打盐碱土水盐入渗过程的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(3):179-183.
- [30] 史海滨.盐渍化土壤水热盐迁移与节水灌溉理论研究[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [31] 张继红,王全九,谭帅,等.微咸水入渗下施加石膏对盐碱土水分运动特征的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):130-135.
- [32] 刘月,李孟钊,徐志杰,等.不同改良方法对盐碱土壤水盐运移效果的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(6):183-191.
- [33] 樊丽琴,李磊,吴霞,等.不同水质淋洗与改良剂施用对银北灌区碱化盐土水盐运移的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):369-376.
- [34] 解倩,王丽梅,齐瑞鹏,等.生物炭对黄绵土水分入渗和持水性能的影响[J].地球环境学报,2016,7(1):65-76.
- [35] 詹舒婷,宋明丹,李正鹏,等.不同秸秆生物炭对土壤水分入渗和蒸发的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):294-300.
- [36] 田宇,陈环宇,郭凯,等.不同咸水梯次滨海盐土入渗过程及水盐分布特征[J].土壤学报,2021,58(4):911-920.
- [37] 刘子涵,才璐,董勤各,等.PE微塑料对土壤水分入渗的影响及入渗模型适宜性评价[J].中国环境科学,2022,42(4):1795-1802.
- [38] 姚宝林,李光永,李发永.南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J].中国农业科学,2014,47(22):4453-4462.
- [39] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [40] 任利东,黄明斌,樊军.不同类型层状土壤持水能力的研究[J].农业工程学报,2013,29(19):105-111.
- [41] 马贵,韩新宁,赵文霞,等.马铃薯生物炭对土壤水分入渗及蒸发的影响[J].新疆农业科学,2021,58(7):1217-1224.
- [42] 王艳阳,魏永霞,孙继鹏,等.不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J].农业工程学报,2016,32(8):113-119.
- [43] Zhang P, Bing X, Jiao L, et al. Amelioration effects of coastal saline-alkali soil by ball-milled red phosphorus-loaded biochar[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: e133904.
- [44] Duan M L, Liu G H, Zhou B B, et al. Effects of modified biochar on water and salt distribution and water-stable macro-aggregates in saline-alkaline soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, DOI: 10.1007/s11368-021-02913-2.
- [45] 王雪,樊贵盛.改善原始盐碱荒地入渗能力措施的试验研究[J].灌溉排水学报,2009,28(6):46-49.
- [46] 王旭,何俊,孙兆军,等.脱硫石膏糠醛渣对碱化盐土入渗及盐分离子的影响研究[J].土壤通报,2017,48(5):1210-1217.
- [47] 周宾.添加脱硫石膏对苏打盐碱土理化性质及水稻产量的影响[J].山西农业科学,2022,50(3):386-390.
- [48] Zhao Y G, Wang S J, Liu J, et al. Fertility and biochemical activity in sodic soils 17 years after reclamation with flue gas desulfurization gypsum[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(12):3312-3322.
- [49] Wang J M, Yang P L. Potential flue gas desulfurization gypsum utilization in agriculture: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(3):1969-1978.
- [50] Li Y B, Xu Q T, Yan S G. The study of improving saline-alkali soils by means of the application of desulfurization gypsums in Baicheng[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 864/867:1219-1225.