

脱硫石膏对盐碱土一维水平吸渗特征及水分运动参数的影响

高小龙^{1,2,3,4}, 王幼奇^{1,2,3,4}, 白一茹^{1,3,4}, 阮晓晗^{1,2,3,4}

(1.宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021; 2.宁夏大学生态环境学院, 银川 750021;

3.西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021;

4.西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要:为探明添加脱硫石膏对盐碱土水分运动参数的影响,以改善和提高银川北部地区土壤结构和土地生产力,进行了室内一维水平土柱吸渗试验。选取6种脱硫石膏添加比例0、1.5%、3%、4.5%、6%和7.5%,探究不同脱硫石膏添加比例下盐碱土水平吸渗特征及水分运动参数的变化。结果表明:脱硫石膏添加减缓了土壤水分入渗过程,随着脱硫石膏添加比例增加,各处理累积入渗量与湿润锋运移距离均逐渐减小。幂函数与 Philip 模型能较好地拟合不同脱硫石膏添加比例下盐碱土水分吸渗特征,吸渗率随脱硫石膏配比增加逐渐减小,毛管力对水的吸持作用减弱。随着脱硫石膏配比增加,土壤饱和含水率依次增加,饱和导水率依次减小,土壤持水能力明显提高。在 Brooks—Corey 模型中,形状系数 n 逐渐增加,进气吸力 h_a 逐渐减小,土壤通气性增强。在相同含水率情况下,随着脱硫石膏配比增加,土壤水分扩散率减小。添加脱硫石膏增加了土壤持水性能,改变了土壤水分分布状况,对土壤水分运动参数有显著影响。研究结果可为合理利用脱硫石膏改良盐碱地提供参考依据。

关键词: 脱硫石膏; 盐碱土; 水平吸渗; Brooks—Corey 模型; 水分运动参数

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0100-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.015

Effects of Desulfurized Gypsum on One—dimensional Horizontal Imbibition Characteristics and Water Movement Parameters of Saline—alkali Soil

GAO Xiaolong^{1,2,3,4}, WANG Youqi^{1,2,3,4}, BAI Yiru^{1,3,4}, RUAN Xiaohan^{1,2,3,4}

(1.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021; 4.Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to explore the effect of adding desulfurized gypsum on the water movement parameters of saline-alkali soil, and improve and increase the soil productivity in the Yinbei Plain area, through an indoor one-dimensional soil column absorption test, 6 desulfurized gypsum treatments were selected: 0, 1.5%, 3%, 4.5%, 6% and 7.5%, to study the horizontal infiltration characteristics and water movement parameters of saline-alkali soil. The results showed that the addition of desulfurized gypsum slowed down the process of soil moisture infiltration. As the proportion of desulfurized gypsum increased, the cumulative infiltration amount and the movement distance of the wet front of each treatment gradually decreased. Power function and Philip model could better fit the water movement characteristics of saline-alkali soil under different desulfurized gypsum addition ratios, and the absorption rate decreased with the increase of the desulfurization gypsum ratios, and the capillary force's water holding effect weakened. As the proportion of desulfurized gypsum increased, the saturated water content of the soil increased and the saturated hydraulic conductivity decreased, the soil water holding capacity was significantly improved. The shape coefficient h_a in the Brooks-Corey model gradually decreased, and the intake suction h_a gradually increased, and soil aeration was enhanced. Under the same moisture content, the soil unsaturated water diffusivity gradually decreased with

收稿日期: 2021-11-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41761049, 41867003); 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03049); 国家重点研发计划重点项目(2018YFC1802906)

第一作者: 高小龙(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤改良和土壤水分运动研究。E-mail: gxl0612sj@163.com

通信作者: 白一茹(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤与环境生态研究。E-mail: yr0823@163.com

the increase of the desulfurization gypsum ratios. The addition of desulfurized gypsum increased the soil water holding capacity, changed the soil moisture distribution, and had a significant impact on soil water movement parameters. This study could provide theoretical support for the rational use of desulfurized gypsum to improve saline-alkali land.

Keywords: desulfurized gypsum; saline-alkali soil; horizontal imbibition; Brooks-Corey model; water movement parameters

土壤盐碱化作为土地退化和作物生长最重要的非生物胁迫,严重制约着农业生产力的发展^[1]。改良盐碱地对缓解人地矛盾、促进农业可持续发展等具有重要意义^[2]。脱硫石膏作为化学工业中燃煤烟气湿法脱硫的副产物,常被用作土壤改良剂,在降低盐碱土 pH、提高作物产量^[3]等方面有显著效果,而关于其对土壤水盐运移过程的影响尚无清晰定论。土壤水分运动参数是土壤物理学中定量评价水分及溶质运移过程的重要指标^[4],研究脱硫石膏添加对土壤水分运动参数的影响对明确盐碱土水盐运移过程、制定合理盐碱地改良措施有重要作用。

土壤水分运动参数一般由土壤导水率、水分扩散率、水分特征曲线等构成,其准确度决定了对土壤水分运动过程描述的可靠性^[5]。自 Darcy 定律提出以来,人们对土壤饱和水运动有了初步研究。上世纪初 Buckingham 将“毛管势”应用于土壤水,出现了土壤水的能态学观点;之后 Richards 将 Darcy 定律引入非饱和土壤水的研究中,进一步推动了土壤水动力学的发展^[5]。在此基础上,已有学者^[6]对土壤水分运动做了相关研究,为计算土壤水分运动参数提供了依据。Shao 等^[7]基于 Richards 方程,采用室内水平吸渗试验和理论模型相结合的简单入渗法推求 Van Genuchten 模型中的参数 α 和 n ,方便快捷地推算了土壤水分运动参数,明确了土壤的导水特性。Wang 等^[8]利用水平入渗法推算 Brooks—Corey 模型参数,通过一些简单易测的入渗试验资料估算土壤水分特征曲线及水分扩散率等水分运动参数,极大简化了土壤水分运动参数的测定过程。近年来,根据以上方法,已有学者^[9]对添加改良剂后盐碱土水分运动参数变化特征做了相关研究。李晓晴等^[10]基于室内土柱模拟试验,研究有机酸添加对盐碱土水分运动参数的影响发现,有机酸添加降低了盐碱土吸渗率、饱和导水率及土壤水吸力,提高了土壤持水性能。王全九等^[11]研究了施加 PAM 对盐碱土饱和含水率、土壤持水性能、吸渗率及非饱和水分扩散率等的影响发现,不同 PAM 施用量对土壤水分运动参数的影响有较大差异。以上研究对不同改良剂添加下盐碱土水分运动参数变化做了详细分析,而脱硫石膏作为一种经济、高效的土壤改良剂,关于其添加下盐碱土水分

入渗特征及参数影响方面研究较少。为更加明确脱硫石膏添加对盐碱土水盐运移规律的影响,有必要对其水分运动参数进行深入研究。

银川北部地区属引黄灌区,地下水位浅、蒸发强,加之长期以来不合理的灌溉措施,使得该区域盐碱化问题突出。同时,作为全国重要的商品粮生产基地之一^[12],探究合理的盐碱化改良措施对维护该区域粮食安全至关重要。因此,本研究采用一维水平土柱吸渗试验,根据湿润锋、累积入渗量及 Philip 模型参数等,推求不同比例脱硫石膏添加下,银川北部盐碱土吸渗率、进气水吸力及水分扩散率等水分运动参数,以期合理利用脱硫石膏改良盐碱土提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土样取自宁夏回族自治区平罗县盐碱荒地(38°57'N, 106°31'E)。选择具备明显盐碱化特征的地块作为试验样地,去除地表杂物采集 0—40 cm 土层深度土样。将土壤放在阴凉、干燥的地方自然风干,过 2 mm 筛备用。土壤质地为灰钙土,容重 1.5 g/cm³,饱和含水率 0.36 cm³/cm³,饱和导水率 0.04 cm/min,滞留含水率 0.008 cm³/cm³;盐分类型主要有 NaCl、Na₂SO₄、Na₂CO₃等,电导率和 pH 分别为 1.42 mS/cm 和 9.2。

脱硫石膏取自宁夏东煤化工基地,其主要成分是二水硫酸钙(CaSO₄·2H₂O),经风干、晾晒后呈白色粉末状,粒径为 30~60 μm,含水率 1%左右,纯度 90%~93%,pH 7.40,电导率 2.60 mS/cm。将其碾磨过筛后放置于室内干燥处备用。

吸渗用水为实验室自行制备超纯水,电阻率达 18 MΩ·cm,为去离子水,以保证不同处理吸渗过程仅受土壤基质势影响。

1.2 试验装置

一维水平吸渗系统由供水装置和水平土柱组成(图 1)。供水装置选用与水平土柱同等规格(内径 10 cm,高 50 cm)的马氏瓶,在吸渗过程中时刻保持供水状态。水平土柱前端是 1 个水平距离为 3 cm 的储水室,储水室上下分别设有外径 1 cm 的通气孔和排水阀,前端设有进水管用以连通马氏瓶。后端是 1 个水平距离为 50 cm 的开口有机玻璃柱,上部每 5 cm 设

置 1 个取土孔,用以吸渗试验结束后,测定不同土层的含水率。储水室与水平土柱之间用均匀布有 2 mm 小孔的法兰连接,用以保证储水室内积水均匀渗入水平土柱中。

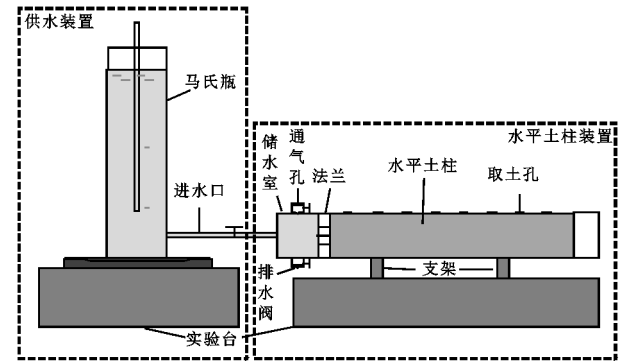


图 1 水平吸渗装置

1.3 试验方法

试验于 2020 年 10 月在宁夏大学环境科学与工程实验室进行,采用室内模拟方法进行一维水平土柱吸渗试验^[5];设计了 6 个脱硫石膏添加比例,研究其对盐碱土吸渗过程的影响;添加比例根据当地农民实际用量及相关学者^[13-14]研究设比进行换算。不同处理分别定为 0 (T0), 1.5% (T1), 3% (T2), 4.5% (T3), 6% (T4), 7.5% (T5), 每组处理重复 3 次。

吸渗开始前,根据不同添加比例将脱硫石膏与盐碱土充分混匀,按容重 1.5 g/cm³ 每 5 cm 分层填装水平土柱。每层填装完成后,对土层表面进行打毛处理,以保证各土层均匀衔接,土层填装厚度为 40 cm。然后,调节马氏瓶与水平柱相对高度,使马氏瓶出水口与储水室最高处位于同一水平面,关闭排水口。吸渗开始后,先打开通气孔,放开止水夹通过马氏瓶向储水室迅速注水,等储水室充满水后,迅速关闭通气孔,连续记录马氏瓶刻度及湿润锋变化情况,直至吸渗试验结束(湿润锋水平位置为 40 cm 时)。水平吸渗过程结束后,通过排水口立即排出储水室内全部水量,并从取土孔取部分土样放入铝盒,用烘干法测定各土层含水率。

1.4 基本原理

(1)水分入渗过程拟合。土壤水分入渗特征符合幂函数变化规律^[15],设定 A、B、C、D 为幂函数拟合参数,将其表述为:

$$Z_f = At^B \tag{1}$$

$$I = Ct^D \tag{2}$$

式中:Z_f为湿润锋(cm);I为累积入渗量(cm);A和C分别为第 1 个计时单位后的湿润锋运移距离和累积入渗量(cm);B和D分别为湿润锋进程和累积入渗量的衰减程度^[15]。

通过公式(1)和公式(2)建立 Z_f、I 与脱硫石膏

添加比例间的函数关系,定量描述脱硫石膏添加量与水分入渗特征间的函数关系,公式为:

$$A = a_1 r^{b_1}, B = a_2 r^{b_2}$$
$$C = a_3 r^{b_3}, D = a_4 r^{b_4} \tag{3}$$

式中:r为脱硫石膏添加比例(kg/kg),r≠0;a₁、a₂、a₃、a₄、b₁、b₂、b₃、b₄均为拟合参数。

Philip^[16]认为,积水入渗过程中任意时刻的土壤水分入渗率与时间存在一定数学关系,公式为:

$$v = 0.5St^{-0.5} + E \tag{4}$$

在水平吸渗过程中,忽略重力势的作用仅考虑土壤基质势将公式(4)处理为:

$$v = 0.5St^{-0.5} \tag{5}$$

对公式(5)积分,用累积入渗量与时间反映水平一维吸渗过程,得到公式为:

$$I = St^{0.5} \tag{6}$$

式中:v为入渗率(cm/min);S为吸渗率(cm/min^{0.5});t为入渗时间(min);E为入渗常数(cm/min)。

(2)水分运动参数推求。描述土壤非饱和和水分运动,首先必须获得土壤水分运动参数^[4],Brooks—Corey模型^[17]反映了土壤水分运动参数之间的关系,土壤水分特征曲线表述式为:

$$S_e = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h}\right)^n & (h \geq h_d) \\ 1 & h < h_d \end{cases} \tag{7}$$

式中:S_e为土壤有效饱和度;θ为土壤含水率(cm³/cm³);θ_s为土壤饱和含水率(cm³/cm³);θ_r为土壤滞留含水率(cm³/cm³);h为土壤水吸力(cm);h_d为进气吸力(cm);n为形状系数。

Wang等^[18]基于简单入渗试验,确定 Brooks—Corey模型中参数n、h_d,公式为:

$$n = \sqrt{\frac{\theta_i - \theta_r}{A_1 + \theta_i - \theta_r} - 1} \tag{8}$$

$$h_d = \frac{A_2}{anK_s} \tag{9}$$

式中:θ_i为初始含水率(cm³/cm³);a为系数,当初始含水率很低时其值通常取 1;K_s表示饱和导水率(cm/min)。

参数 A₁和 A₂可用一维水平入渗累积入渗量(I, cm)、入渗率(v, cm/min)、湿润锋(Z_f, cm)及时间(t)(min)之间的关系^[8]为:

$$I = A_1 Z_f \tag{10}$$

$$v = \frac{A_2}{Z_f} \tag{11}$$

非饱和土壤水分扩散率是反映土壤水分运动特征的重要水分运动参数,Wang等^[8]通过一维水平吸

渗数据来推求饱和土壤水分扩散率($D_s, \text{cm}^2/\text{min}$), 并通过扩散率参数($L, \text{cm}^3/\text{cm}^3$), 推导出非饱和土壤水分扩散率($D_{(\theta)}, \text{cm}^2/\text{min}$)为:

$$D_s = \frac{A_1 A_2}{(\theta_s - \theta_i)(\theta_s - \theta_i - A_1)} \tag{12}$$

$$L = \frac{A_1}{\theta_s - \theta_i - A_1} - 1 \tag{13}$$

$$D_{(\theta)} = D_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^L \tag{14}$$

2 结果与分析

2.1 脱硫石膏添加对土壤水分吸渗特性的影响

不同脱硫石膏添加比例下湿润锋和累积入渗量随着时间的变化情况见图 2, 各处理累积入渗量随时间呈先快后慢的增长趋势, 且随脱硫石膏添加比例不同增长趋势有所差异, 湿润锋随吸渗时间的变化规律与累积入渗量随时间变化规律基本一致。吸渗前

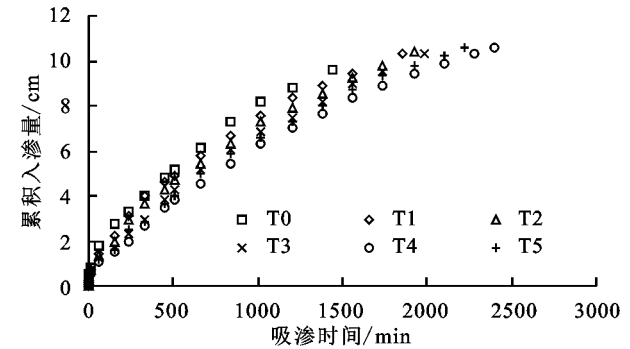


图 2 脱硫石膏添加对湿润锋和累积入渗量的影响

表 1 幂函数拟合结果

处理	A	B	R ²	C	D	R ²
T0	1.030	0.491	0.997	0.151	0.572	0.998
T1	0.885	0.505	0.999	0.140	0.573	0.999
T2	0.586	0.558	0.999	0.111	0.601	0.999
T3	0.474	0.582	0.999	0.069	0.661	0.998
T4	0.389	0.605	0.999	0.072	0.649	0.998
T5	0.392	0.597	0.999	0.060	0.667	0.998

2.2 脱硫石膏配比分析及吸渗模型参数拟合

脱硫石膏添加比例不同, 各处理土壤水分吸渗特征有明显差异, 为分析脱硫石膏配比与土壤水分吸渗特征之间的联系, 建立 Z_f 、 I 与脱硫石膏添加比例间的函数关系, 代入实测数据对公式(3)进行拟合, 拟合结果见公式(15)和公式(16)。

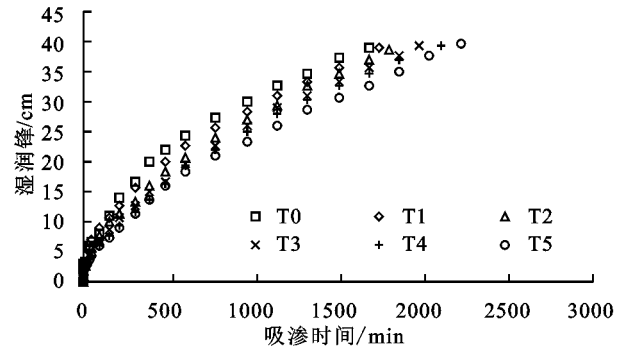
$$\begin{cases} A = 1.098r^{-0.553} & (R^2 = 0.988) \\ B = 0.490r^{0.109} & (R^2 = 0.926) \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} C = 0.176r^{-0.525} & (R^2 = 0.916) \\ D = 0.550r^{0.099} & (R^2 = 0.852) \end{cases} \tag{16}$$

上述幂函数关系的 R^2 均 > 0.85 , 拟合效果较好。将公式(15)和公式(16)分别代入公式(1)和公式(2)。得到湿润锋、累积入渗量与脱硫石膏不同添加比例及时间的变化关系, 见公式(17)和公式(18)。

期 120 min 内, 湿润锋与累积入渗量均迅速增加, 各处理差异较少。随着吸渗时间推移, 各处理累积入渗量及湿润锋差异逐渐变大, 相同吸渗时间脱硫石膏添加比例越大, 累积入渗量和湿润锋越小。1 200 min 时, T1~T5 累积入渗量较 T0 分别减小了 5.14%, 10.08%, 14.98%, 16.71%, 19.96%, 湿润锋分别减小了 4.55%, 7.26%, 10.33%, 13.28%, 19.30%。脱硫石膏添加减缓了土壤水分吸渗过程。

为了更好地探究脱硫石膏添加对水平吸渗特性的影响, 通过幂函数对该过程进行拟合, 建立湿润锋、累积入渗量与时间的函数关系。由表 1 可知, 各处理决定系数(R^2)均 > 0.99 , 拟合效果较好。随着脱硫石膏添加比例增加, A、C 整体呈减小趋势, B、D 呈增大趋势。幂函数拟合结果表明, 相同吸渗时间内, 脱硫石膏配比增加湿润锋及累积入渗量逐渐减小。幂函数拟合参数能够表征水分吸渗过程。



$$Z_f = 1.098r^{-0.553}t^{0.490r^{0.109}} \tag{17}$$

$$I = 0.176r^{-0.525}t^{0.550r^{0.099}} \tag{18}$$

在一维水平吸渗试验中, 当其他条件相同时, 一定时间内湿润锋、累积入渗量与脱硫石膏配比间存在良好的函数关系。可据此估算不同脱硫石膏配比下银北地区盐碱土水分吸渗特征, 求算相应的水分运动参数, 以期为合理利用脱硫石膏改良盐碱地提供参考。

依据实测累积入渗量与时间的关系, 利用 Philip 模型拟合水分运动参数, 反映脱硫石膏添加对土壤吸渗率的影响。Philip 模型对一维水平吸渗过程拟合效果较好, 各处理决定系数(R^2)均在 0.97 以上。吸渗率(S)是衡量土壤依靠毛管力吸收或释放液体的能力^[9], 随脱硫石膏配比增加 S 逐渐减小, 变化范围为 0.204~0.244; 与 T0 相比, T1~T5 处理分别减小了 4.95%, 8.00%, 12.42%, 13.20%, 16.40%。说明脱硫石膏添加削弱了土壤水分吸渗能力, 其原因是脱硫石膏改变了土壤有效孔隙度, 使得吸渗过程中土壤毛管水吸力降低^[14]。

2.3 脱硫石膏添加对土壤饱和含水率和饱和导水率的影响

土壤饱和含水率是反映土壤持水性能的重要水

力学参数,饱和含水率越大,土壤持水性能越强。饱和和导水率影响降雨入渗及溶质运移过程^[19],是反映土壤导水性能的重要指标。由图 3 可知,在不同脱硫石膏添加比例下,土壤饱和含水率及饱和导水率的变化情况。脱硫石膏添加比例增加土壤饱和含水率随之增加,土壤饱和和导水率逐渐减小。根据土壤饱和含水率及饱和导水率变化规律,利用二项式对其进行拟合,拟合结果见公式(19)和公式(20)。

$$\theta_s = -0.0003x^2 + 0.0083x + 0.361(R^2 = 0.989)$$

(19)

$$K_s = -0.00006x^2 - 0.0023x + 0.040(R^2 = 0.996)$$

(20)

该二项式较好拟合了不同脱硫石膏添加比例下土壤饱和含水率和饱和导水率变化情况, R^2 均 >0.98 。在一定脱硫石膏添加范围内,可用其表示不同配比下土壤饱和含水率及饱和导水率的变化情况,以期对该区域水盐调控和精准灌溉提供帮助。

2.4 脱硫石膏添加对 Brooks—Corey 模型参数的影响

由表 2 可知,不同脱硫石膏添加比例下 Brooks—Corey 模型参数拟合结果。通过实测累积入渗量、湿润锋及入渗率拟合 A_1 、 A_2 ,累积入渗量与湿润锋之间、入渗率与湿润锋倒数之间有良好的线性关系,决定系数均 >0.88 ,拟合效果较好。随脱硫石膏添加比

例增加,系数 A_1 增大, A_2 减小。将 A_1 、 A_2 代入公式(8)和公式(9)计算 Brooks—Corey 模型参数 h_d 、 n 。 h_d 表示土壤开始排水的临界进气吸力值,是表征土壤通气性的水分运动参数,其值越小表示土壤透气性越好^[20]。脱硫石膏添加比例越大, h_d 越小,与 T0 相比其他处理进气吸力值分别减小了 12.21%,23.37%,38.40%,39.04%,52.15%。而形状系数(n)随石膏配比增加而增大,T1~T5 较 T0 分别增长了 5.57%,7.41%,8.32%,13.79%,14.36%。 n 与 h_d 表现出相反的变化规律,脱硫石膏添加改变了盐碱土水分运动参数,随脱硫石膏添加比例增加,Brooks—Corey 模型参数 h_d 、 n 呈规律性变化。明确以上水分运动参数变化规律,可为了解该区域盐碱土盐运移特征提供数据支撑。

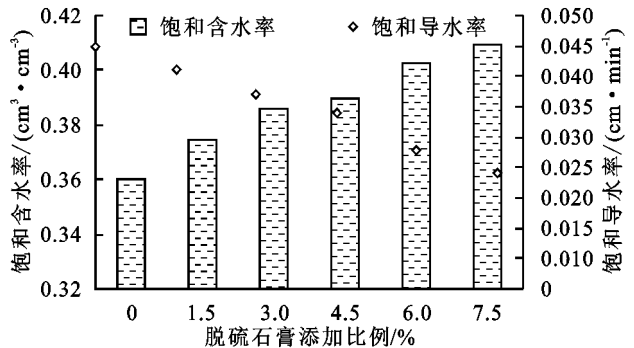


图 3 脱硫石膏添加对土壤饱和含水率和导水率的影响

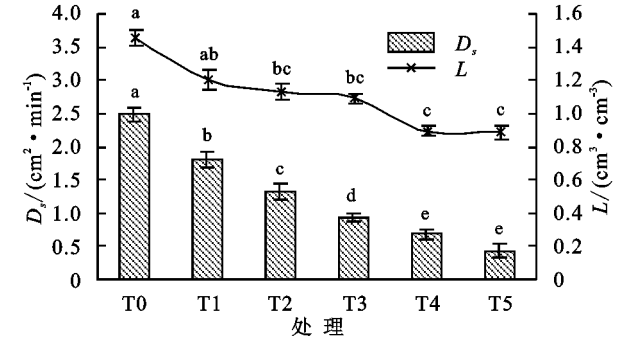
表 2 Brooks—Corey 模型参数

处理	$\theta_s /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_r /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	n	m	$h_d /$ cm	A_1	R_1^2	A_2	R_2^2
T0	0.360	0.0080	0.638	3.915	13.988	0.250	0.988	0.357	0.908
T1	0.374	0.0082	0.674	4.022	12.281	0.252	0.992	0.298	0.959
T2	0.386	0.0083	0.686	4.057	10.719	0.257	0.997	0.235	0.927
T3	0.390	0.0084	0.692	4.075	8.617	0.258	0.994	0.173	0.947
T4	0.409	0.0085	0.726	4.179	8.528	0.258	0.997	0.142	0.920
T5	0.402	0.0086	0.728	4.184	6.693	0.262	0.996	0.093	0.888

2.5 脱硫石膏添加对土壤非饱和和水分扩散率的影响

基于公式(12)和公式(13)将 θ_s 、 θ_r 与参数 A_1 、 A_2 代入求得土壤饱和和扩散率(D_s)及扩散率参数(L)。由图 4 可知,随脱硫石膏添加比例增加, D_s 和参数 L 均呈减小趋势,与 T0 相比,其他处理 D_s 减幅为 27.98%~82.47%, L 减幅为 17.35%~38.99%。除 T4、T5 外 D_s 在其余各处理间存在显著差异性($P<0.05$), L 在 T0 与其他处理间存在显著差异性($P<0.05$)。

添加脱硫石膏可使饱和和土壤水分扩散过程变缓,且变缓程度随石膏添加量的增加而增加。说明当土壤吸水饱和后,添加了脱硫石膏后的土壤较无添加土壤有效孔隙度减小,石膏在与盐碱土发生化学反应生成 CaCO_3 沉淀^[3],同时未溶解的细小石膏颗粒进入土粒间隙阻碍了水分的快速迁移^[14],使得土体大孔隙数量减少,土壤水分吸渗变得更加均匀。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 4 土壤水分饱和和扩散率及参数

通过 D_s 和 L 确定非饱和土壤水分扩散率方程(14),不同脱硫石膏添加比例下非饱和土壤水分扩散率方程分别用 $D_0(\theta)$ 、 $D_1(\theta)$ 、 $D_2(\theta)$ 、 $D_3(\theta)$ 、 $D_4(\theta)$ 和 $D_5(\theta)$ 表示。根据非饱和土壤水分扩散率方程,随机

均匀生成土壤含水率数值,代入方程比较不同含水率情况下各处理土壤水分扩散率的变化情况。随含水率增大,各处理土壤非饱和水分扩散率均逐渐增大,这种增长属非线性指数增长,表现为高含水率土壤水分扩散率明显大于低含水率下土壤水分扩散率。当含水率 $>0.1\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,随着含水率增加,非饱和土壤水分扩散率变化较小,各处理之间差异不明显。当含水率 $>0.1\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,随着含水率增加,非饱和土壤水分扩散率迅速增大,且各处理间差异逐渐明显。

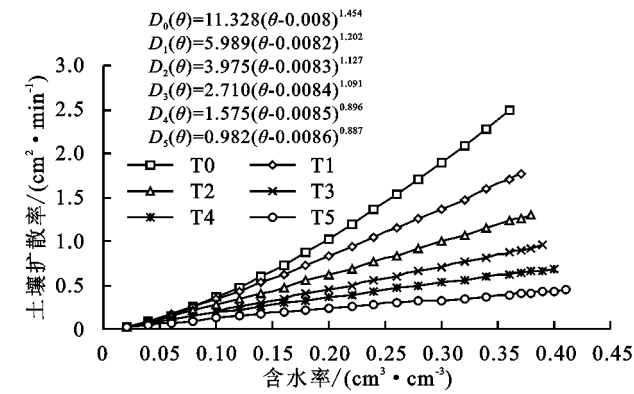


图 5 非饱和土壤水分扩散率曲线

3 讨论

银北平原气候干旱,土壤沙化严重,加之长期大水漫灌,使得地下水位上升,盐分表聚,土壤次生盐渍化问题严重。脱硫石膏因富含 CaSO_4 等物质可有效置换出盐碱土中的交换性 Na^+ ,与 SO_4^{2-} 结合形成中性盐 Na_2SO_4 ,使得土体 pH 大大降低,有效改善土壤化学性质。本研究所采土样为砂质土壤,土壤黏粒含量较低,土体漏水漏肥严重。加入脱硫石膏对水分吸渗过程有较明显影响,随脱硫石膏添加比例增加,湿润锋、累积入渗量、吸渗率及饱和导水率均减小,土壤饱和含水率增加。由于脱硫石膏不仅可以有效改善土壤团聚体结构^[21],而且脱硫石膏颗粒小,较难溶于水,未溶解的石膏颗粒及 CaCO_3 和 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 等难溶物质随水分迁移填充到粗砂粒中,土壤孔隙度变小,使得水分吸渗过程变缓,有效改善了砂质土壤水分快速下渗的问题。张辉等^[22]研究表明,当添加一定量脱硫石膏时,砂质碱土水力传导度随之降低,与本文研究结果一致。程镜润等^[23]研究认为,当石膏添加比例达到一定程度时,盐碱土因离子交换作用形成的大团聚体并不能增加土体水分迁移通道,而细小石膏颗粒填充降低了土壤有效孔隙度。可见脱硫石膏的施入可有效改善该区域砂质碱土漏水漏肥严重的问题,有利于阻碍地表水与地下水的连通,抑制灌区土壤返盐过程。

利用一维垂直水平入渗试验,结合 Richards 方

程,推求 Brooks—Corey 模型参数 h_d 、 n 及土壤水分扩散率^[8]。 h_d 随脱硫石膏添加比例增加而减小,形状系数 n 随脱硫石膏配比增加而增大,二者随脱硫石膏添加比例不同呈相反的变化规律,单鱼洋等^[9]和王全九等^[11]研究也表明, n 与 h_d 有相反的变化规律。随含水率增大,各处理土壤非饱和水分扩散率均逐渐增大,这种增长属非线性指数增长,表现为高含水率土壤水分扩散率明显大于低含水率下土壤水分扩散率,是由于土壤水分吸渗过程中主要推动力为土壤吸力梯度。当含水率较大时,湿润锋干—湿界面土壤吸力梯度较大,土壤水分扩散更快。当土壤含水率较小时,干—湿界面土壤吸力梯度较小,水分扩散缓慢。且土壤吸力梯度的变化是非线性的,因而扩散率的变化也是非线性的^[24]。在相同含水率情况下,随着脱硫石膏添加比例增加,土壤非饱和水分扩散率逐渐减小。是由于土壤水分吸渗过程中,需经历土壤颗粒表面吸持膜状水、土壤小孔隙吸持毛管水、自由水吸渗 3 个吸渗阶段^[8,24]。低含水率时,土壤吸渗过程仅满足前 2 个阶段,土壤的吸持扩散作用较弱,不同脱硫石膏配比下土壤微孔隙数量、石膏的吸水作用对水分扩散率影响较小。在高含水率时,土壤吸持大量自由水,土体中大孔隙数量决定了水分扩散强度,脱硫石膏添加填充了土壤中部分大孔隙,故水分扩散率减小。明确脱硫石膏添加下盐碱土水分运动及其参数变化规律,可为了解该区域盐碱土盐运移特征提供数据支撑。

4 结论

(1)向土壤中施加脱硫石膏可以减缓水分吸渗过程,相同吸渗时间,脱硫石膏添加比例越大,累积入渗量及湿润锋越小。脱硫石膏配比与水分吸渗特征间存在良好的函数关系。Philip 模型也能较好拟合土壤水分吸渗过程,吸渗率(S)随脱硫石膏添加比例增加逐渐减小。

(2)随脱硫石膏添加比例增加,土壤饱和导水率逐渐减小,饱和含水率逐渐增大,土壤持水性能增加,保水保肥能力提高。土壤饱和导水率、饱和含水率与脱硫石膏添加比例间呈现较好的二项式关系。

(3)随脱硫石膏添加比例增加,Brooks—Corey 模型参数(n)随之增大,进气吸力(h_d)逐渐减小,土壤通气性明显改善。含水率相同时,土壤水分扩散率随脱硫石膏配比增加逐渐减小,土体水分分布更加均匀。

参考文献:

[1] Nan J X, Chen X M, Wang X Y, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum and humic acid on

- soil physicochemical properties and rapeseed yield of a saline-sodic cropland in the eastern coastal area of China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(1): 38-50.
- [2] Shi L, Xu P, Xie K Z, et al. Preparation of a modified flue gas desulphurization residue and its effect on pot sorghum growth and acidic soil amelioration [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(3): 978-985.
- [3] 贺坤, 童莉, 盛钊, 等. 烟气脱硫石膏和园林废弃物堆肥混合施用对滨海盐渍土壤的改良[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(2): 552-559.
- [4] 邵明安, 王全九. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 I. 理论分析[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1): 1-8.
- [5] 来剑斌. 土壤水分运动特征及其参数确定[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
- [6] 马美红, 张书函, 王会肖, 等. 非饱和土壤水分运动参数的确定: 以昆明红壤土为例[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 38-42.
- [7] Shao M A, Horton R. Integral method for estimating soil hydraulic properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(3): 585-592.
- [8] Wang Q J, Horton R, Shao M A. Horizontal infiltration method for determining brooks: Corey model parameters [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(6): 1733-1739.
- [9] 单鱼洋, 李晓菊, 王全九, 等. 磁化微咸水一维水平吸渗特征与水分运动参数分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 266-274.
- [10] 李晓晴, 周蓓蓓, 杨扬, 等. 有机酸改良剂对盐碱土水盐运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 307-313.
- [11] 王全九, 张继红, 谭帅. 微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究[J]. *土壤学报*, 2016, 53(4): 1056-1064.
- [12] 王幼奇, 白一茹, 展秀丽. 在不同尺度下宁夏引黄灌区农田土壤养分空间变异分析[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(2): 209-215.
- [13] 梁嘉平, 史文娟, 王全九. 石膏对土壤水分入渗特性的影响[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 160-164.
- [14] 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.
- [15] 王全九, 孙海燕, 姚新华. 滴灌条件下石膏配比对盐碱土水盐运移特征影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 36-40.
- [16] Philip R J. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution [J]. *Soil Science*, 1957, 83(5): 345-357.
- [17] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media [M]. Fort Collins: Colorado Sate University, 1964: 3-27.
- [18] Wang Q J, Shao M A, Horton R. A simple method for estimating water diffusivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 713-718.
- [19] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 GIS 和随机森林算法的宁东土壤饱和和导水率分布与预测[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 285-293.
- [20] 翟俊瑞, 谢云, 李晶, 等. 不同侵蚀强度黑土的土壤水分特征曲线模拟[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 116-122.
- [21] Nan J K, Chen X M, Chen C, et al. Impact of flue gas desulfurization gypsum and lignite humic acid application on soil organic matter and physical properties of a saline-sodic farmland soil in Eastern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(9): 2175-2185.
- [22] 张辉, 陈小华, 付融冰, 等. 脱硫石膏对不同质地滨海盐碱土性质的改良效果[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(7): 4397-4403.
- [23] 程镜润, 陈小华, 刘振鸿, 等. 脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(6): 1505-1513.
- [24] 余冬立, 郑加兴, 刘营营, 等. 围垦年限和土壤容重对海涂土壤水分运动参数的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 120-125.