

石膏对土壤水分入渗特性的影响

梁嘉平¹, 史文娟¹, 王全九^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048; 2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 分析石膏对土壤水分入渗特性的影响, 以为土壤入渗模型及石膏更好地应用于生产实际、土壤改良等领域提供科学依据。[方法] 采用室内一维土柱模拟试验, 利用垂直一维入渗代数模型分析在施加石膏前期, 其对土壤水分运动特性的影响。[结果] 在施加石膏前期, 与对照组相比, 随着石膏施量的增加, 累积入渗量分别减小了 10.2%, 16.15%, 30.73% 和 40.38%; 入渗率分别减小了 18.78%, 21.07%, 42.13% 和 54.82%; 土壤剖面含水量显著降低。利用垂直一维入渗模型对土壤水分入渗资料进行分析可知, 与对照组相比, 随着石膏施量的增加, 土壤饱和导水率逐渐减小, 且分别减小了 18.42%, 36.84%, 59.21% 和 75.00%; 而非饱和土壤水吸力分配系数 β 与土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数 α 无明显变化规律。预测值累积入渗量与实测累积入渗量之间的接近程度较高, 相关性较好, 且决定系数 R^2 均在 0.99 以上, 且均方根误差小于 0.5, 说明在施加石膏前期, 其可以有效地削弱土壤的入渗能力, 减少水分渗漏, 降低入渗速率, 而且还可以改变土壤水分的分布状况, 且利用垂直一维入渗模型可以较好地分析石膏对土壤水分特征的影响。[结论] 石膏可以有效地降低土壤的入渗能力和导水特性。

关键词: 盐碱地; 石膏; 垂直一维代数模型; 累积入渗量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0160-05

中图分类号: S278, 157.2

文献参数: 梁嘉平, 史文娟, 王全九, 等. 石膏对土壤水分入渗特性的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 1640-1644. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.027

Effects of Gypsum on Soil Water Infiltration Characteristics

LIANG Jiaping¹, SHI Wenjuan¹, WANG Quanjiu^{1,2}

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of gypsum on soil water infiltration characteristics were studied to provide basis for soil infiltration modeling and the application of gypsum in the fields of production practice, soil improvement and so on. [Methods] An experiment using one-dimensional infiltration vertical soil column was conducted to test the influences of gypsum on the soil moisture infiltration characteristics. [Results] The results indicated with increasing of gypsum content, the cumulative infiltrations were reduced by 10.2%, 16.15%, 30.73% and 40.38% respectively, and the infiltration rates reduced by 18.78% and 21.07%, 42.13% and 54.82% in the early stage of gypsum application. Moreover, soil profile water content decreased significantly too. The data of soil moisture infiltration were analyzed by the vertical one dimensional infiltration model. In the model, saturated hydraulic conductivities reduced by 18.42%, 36.84%, 59.21% and 75.00% respectively, while the changes of distribution coefficient and comprehensive shape coefficient were not obvious with the increasing of gypsum content. The cumulative infiltration was highly correlated with the measured cumulative infiltration, having a coefficient of determination (R^2) over than 0.998, and root mean square error less than 0.5. So, this study indicated gypsum could not only be able to weak effectively the soil

收稿日期: 2016-05-06

修回日期: 2016-05-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“旱区盐碱地膜下滴灌间作棉田水盐迁移机制及土壤-植物系统响应”(51379173); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS085); 新疆维吾尔自治区科技计划项目(2011301033)

第一作者: 梁嘉平(1990—), 男(汉族), 甘肃省崇信县人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源与生态环境。E-mail: liangjpxaut@163.com。

通讯作者: 史文娟(1972—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 教授, 主要从事农业水土资源与生态环境方面的研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn。

infiltration capacity and reduce water leakage, but also can change the distribution of soil moisture. The vertical one-dimensional infiltration model performed well in analyzing the influences of gypsum on soil water characteristics. [Conclusion] Gypsum can effectively reduce the infiltration capacity of the soil and change the characteristics of water transmissibility.

Keywords: saline alkali land; gypsum; vertical one-dimensional infiltration model; cumulative infiltration value

土壤退化已成为人类面临的重大威胁,盐碱地和土壤次生盐碱化是人类面临的一个世界性生态环境问题。中国新疆等干旱地区,降雨稀少,蒸发强烈,土壤盐碱化严重,盐碱类型的低产田达 $1.133 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约占总耕地面积的 $1/3$ ^[1]。而且碱化土壤和盐碱性土壤具有减小土壤导水率和入渗率的特性,这是因为盐碱土壤和碱化土壤吸附了大量的交换性钠,而高浓度交换性钠可使土壤颗粒分散,进而堵塞土壤孔隙,阻碍土壤水分的入渗^[2]。为了解决这一问题,石膏被作为一种化学改良剂来提供钙离子置换出土壤胶体上的交换性钠,尤其在美国和欧洲国家石膏被应用到农业中改良盐碱土已经有长达 250 a 的历史^[2-3]。国外研究学者 Rasouli^[4], Blum^[5] 和 Mitchell^[6] 等基于大田试验,应用石膏改良盐碱土壤,结果表明,石膏不仅能够改善土壤的理化特性,还能提高作物产量。国内研究学者吕二福良等^[7] 通过石膏不同施加方法改良盐碱化土壤,结果表明,当石膏与土壤混施时石膏利用充分,碱化土壤改良效果明显。王金满等^[8] 等利用石膏改良盐碱土壤,结果表明,石膏能够提高向日

葵的出苗率。但上述研究均是石膏长期改良后的结果,而石膏的溶解度较低,在施加石膏初期势必也会涉及到土壤水分运动这一关键因素的变化,但在施加石膏前期,关于石膏对土壤水分运动的影响鲜有报道。鉴于此,本研究采用室内一维土柱模拟试验,利用垂直一维代数模型分析了石膏对土壤水分入渗特性的影响,以期土壤入渗模型及石膏更好地应用于生产实际、土壤改良等领域提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土样取自新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局水利科研所(灌溉试验站)田间试验小区($41^{\circ}35' \text{ N}$, $86^{\circ}10' \text{ E}$),采用环刀法和烘干法测定的土壤容重和初始含水率分别为 1.64 g/cm^3 和 $0.0048 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。去除土样中的枯枝、异物,放在阴凉、干燥的实验室内,让其风干,过 2 mm 筛以留备用。采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定供试土壤的机械组成,测定结果详见表 1。

表 1 供试土样的机械组成

土壤质地	黏粒(<0.002 mm)	粉粒($\geq 0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$)	砂粒($\geq 0.02 \sim 2 \text{ mm}$)	%
砂质壤土	2.89	18.59	78.52	

1.2 试验方法

入渗试验中,将石膏与上述土壤按照质量比(0, 1.8%, 3.6%, 5.4%, 7.2%)分别混合均匀,然后将混合后的土样按容重为 1.64 g/cm^3 分层(5 cm)装入内径为 5 cm、高为 46 cm 的透明有机玻璃,装土高度为 40 cm,并采用相同规格的马氏瓶供水。在装填的过程中,层间刮毛,装填完成后应在土壤表面放置一层滤纸,防止供水初期水流冲刷土壤表面,并保证水流均匀下渗。入渗过程中,用秒表计时,并记录湿润锋运移距离和马氏瓶的水位,通过计算获得湿润锋和累积入渗量随入渗时间的变化关系。入渗结束时,全部停止供水,并迅速吸干土壤表层积水,从表层至湿润锋处每隔 2 cm 提取土样,以测定各处理土壤剖面不同深度处的含水率。为了保证试验结果的可靠性,每个处理都进行了 2 次重复试验,经过分析两次重复试验结果基本一致。

1.3 基本理论

王全九等^[9] 根据达西定律用数学方法描述出一维垂直水分运动基本方程,利用 Parlange 假定和 Brooks-Corey 模型推求出垂直一维非饱和土壤水分运动代数模型来描述土壤水分运动过程。

1.3.1 入渗率 垂直一维非饱和土壤水分入渗率计算公式为:

$$i = \frac{k_s}{\beta z_f} + k_s \quad (1)$$

式中: i ——入渗率(cm/min); β ——非饱和土壤吸力分配系数($1/\text{cm}$); α ——土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数(无量纲); k_s ——饱和导水率(cm/min); z_f ——湿润锋(cm)。

令 $k_s/\beta = a$, $k_s = b$; 将公式(1)转化为 $i - 1/z_f$ 的线性函数:

$$i = a \frac{1}{z_f} + b \quad (2)$$

将实测数据代入公式(2)拟合求解 a, b , 获得饱和导水率 k_s 和非饱和土壤吸力分配系数 β 。

1.3.2 含水率 垂直一维非饱和土壤水分含水率计算公式为:

$$\theta = \left(1 - \frac{z}{z_f}\right)^a (\theta_s - \theta_r) + \theta_r \quad (3)$$

将公式(3)转化为

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 - \frac{z}{z_f}\right)^a \quad (4)$$

令 $(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r) = M, 1 - z/z_f = N$; 得公式(5)如下:

$$M = N^a \quad (5)$$

则公式(5)为 $M-N$ 的幂函数, 利用实测数据求得非饱和导水率综合形状系数 α 。

式中: θ ——土壤剖面实测含水率 (cm^3/cm^3); θ_s ——饱和含水率 (cm^3/cm^3); θ_i ——初始含水率 (cm^3/cm^3); θ_r ——滞留含水率 (cm^3/cm^3)。

1.3.3 累积入渗量 垂直一维非饱和土壤累积入渗量计算公式为:

$$I = z_f(\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \alpha} + (\theta_r - \theta_i) z_f \quad (6)$$

由于供试土壤初始含水率较小, 假定 $\theta_r = \theta_i$, 那么公式(6)变化为公式(7)。

$$I = \frac{\theta_s - \theta_i}{1 + \alpha} z_f \quad (7)$$

式中: I ——累积入渗量 (cm); t ——入渗时间 (min)。

2 结果分析

2.1 不同石膏施量对土壤水分入渗特征的影响

2.1.1 不同石膏施量对累积入渗量的影响 由图1可以看出, 在整个入渗过程当中, 随着入渗时间的增大, 累积入渗量逐渐增大。入渗初期, 各处理之间的累积入渗量相差不大, 石膏对累积入渗量的影响比较

微弱, 但随着时间的推移, 尤其在在 200 min 以后的同一入渗历时, 石膏对累积入渗量的影响开始显现, 随着石膏施量的增加, 累积入渗量呈减小趋势, 并逐渐拉开差距, 入渗结束时, 累积入渗量分别减小了 10.2%, 16.15%, 30.73%, 40.38%。由此可得, 石膏可以有效减缓土壤水分的入渗量。

2.1.2 石膏施量对入渗率的影响 由图1可知, 在整个入渗过程当中, 随着入渗时间的增大, 入渗率起初逐渐减小, 最终基本趋于稳定。随着时间的推移, 尤其在 200 min 以后, 各处理的入渗率基本趋于稳定入渗状态, 石膏对入渗率的影响比较明显, 且随着石膏施量的增加, 同一入渗历时的入渗率呈减小趋势, 入渗结束时, 稳渗率从对照组的 0.018 8 cm/min 减小到石膏施量为 7.2% 的 0.008 5 cm/min, 与对照组相比, 随着石膏施量的增加, 入渗率分别减小了 18.78%, 21.07%, 42.13%, 54.82%。综上所述, 石膏可以有效削弱土壤的入渗。

由达西定律可知, 土壤水力传导度和土水势梯度决定了土壤水分入渗量, 而土壤质地、干容重、含水率和基质势共同决定了土壤水力传导度^[10]。本研究不同处理是在土壤质地、干容重、含水率基本相同的条件下进行的垂直一维入渗试验。因此, 基质势为影响土壤水力传导度的主要因素。而基质势又由土壤结构和土壤孔隙分部状况决定^[11]。在灌溉水中, 石膏的溶解度较小, 大约为 30 meq/L^[12], 而且石膏颗粒小, 因此在土壤中加入石膏后, 小颗粒会进入土壤孔隙堵塞水流通道, 改变土壤结构和土壤孔隙的分布状况, 进而影响入渗水流的有效过水断面面积, 进而影响土壤水力传导度的大小, 那么土壤水分入渗量和入渗速率便会随着石膏施量的增大, 呈现出逐渐减小的变化规律。

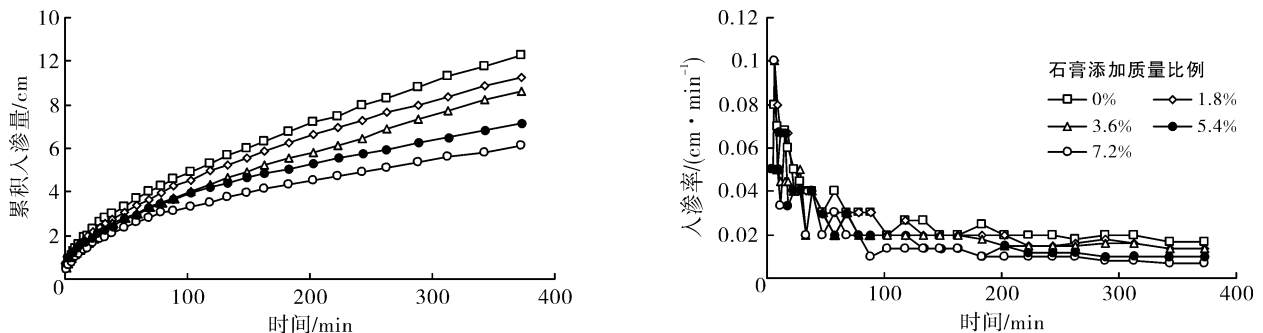


图 1 不同石膏施量对累积入渗量、入渗率的影响

2.2 不同石膏施量对土壤剖面含水率的影响

为了进一步分析石膏对土壤水分分布的影响,将不同石膏施量对土壤剖面含水率的分布情况绘于图 2。由图 2 可知,处理组的土壤剖面含水率均低于对照组的土壤剖面含水率,且随着土壤剖面深度的增加显著减小;此外,在同一土壤剖面深度处,随着石膏施量的增加,土壤剖面含水率显著减小。说明石膏不仅可以降低土壤的持水量,而且还可以改变土壤水分的分布状况,以防止农田水分的深层渗漏。

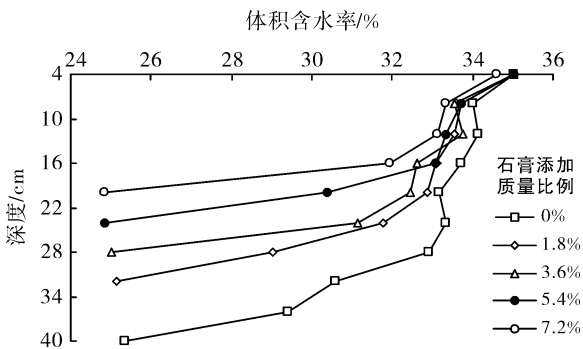


图 2 不同石膏施量对土壤剖面含水量的影响

2.3 不同石膏施量对垂直一维入渗模型参数的影响

为了进一步分析不同石膏施量对土壤水分入渗特征的影响,利用王全九提出的垂直一维入渗代数模型对试验资料进行处理。通过公式(2)和公式(5)对实测资料进行拟合求解,获得垂直一维入渗模型参数 k_s, α 和 β , 拟合效果较好, 决定系数 R^2 均在 0.97 以上, 其结果见表 2。从表中可以看出, 与对照组相比, 随着石膏施量的增加, 土壤饱和导水率呈减小趋势, 且分别减小了 18.42%, 36.84%, 59.21%, 75%; 而非饱和土壤水吸力分配系数 β 与土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数 α 无明显变化规律。

土壤饱和导水率 k_s 是指土壤在饱和状态、即土壤孔隙全部充满水时的土壤导水速率, 其数值近似于土壤稳定入渗速率, 是表征土壤水分入渗能力的重要参数之一^[13], 而且土壤饱和导水率是土壤质地、容重、孔隙分布特征的函数, 其中孔隙分布特征对饱和导水率的影响最大^[14]。将石膏加入土壤中, 由于石膏的溶解度较小, 当水分开始入渗时, 小颗粒随水进入土壤孔隙中, 堵塞水流通道, 改变了土壤空隙分布特征, 进而减小了土壤的饱和导水率。而且, 随着石膏施量的增大, 饱和导水率呈显著的减小趋势。综上所述, 石膏可以明显的削弱土壤的入渗能力。

表 2 垂直一维入渗代数模型的拟合参数

石膏施量/%	垂直一维入渗公式				
	饱和导水率/(cm · min ⁻¹)	分配系数/(1 · cm ⁻¹)	决定系数 R^2	综合形状系数	决定系数
0	0.008	0.021	0.98	0.079	0.98
1.8	0.006	0.022	0.99	0.073	0.98
3.6	0.005	0.02	0.98	0.090	0.97
5.4	0.003	0.014	0.97	0.044	0.98
7.2	0.002	0.012	0.98	0.096	0.97

2.4 垂直一维入渗模型分析

为了进一步分析垂直一维入渗模型所描述的土壤水分运动特征关系之间的准确性, 利用公式(2)和公式(5)所求参数 k_s 和 α , 根据公式(7)预测土壤水分入渗量, 并与另一组数据(重复组)的实测累计入渗量分析比较, 并进行回归分析, 用均方根误差来反映预测值与实测值的接近程度。分析结果可见(表 3), 不同石膏施量下, 利用公式(7)

预测的累积入渗量能够很好, 模拟实际水分入渗过程。表 3 可以看出, 利用公式(7)预测的累积入渗量虽然略小于实测累积入渗量, 但是通过回归分析可知, 不同施量下的预测值与实测值的相关性很好, 决定系数 R^2 均在 0.99 以上, 且均方根误差都小于 0.5, 误差较小, 预测值与实测值的接近程度较高。由此可见, 公式(7)可以较好地模拟土壤水分的入渗量。

表 3 实测与预测累积入渗量的回归分析

项目	石膏施量/%				
	0	1.8	3.6	5.4	7.2
回归方程	$y = 0.978x$	$y = 0.975x$	$y = 0.955x$	$y = 1.032x$	$y = 0.957x$
决定系数 R^2	0.99	0.99	1	0.99	0.99
均方根误差 RMSE	0.15	0.16	0.22	0.15	0.19

3 讨论

石膏对土壤水分入渗特性以及土壤剖面含水率的影响均较大,不仅可以有效减少土壤水分的入渗,削弱土壤的入渗能力,而且还可以降低土壤的持水能力,改变土壤水分的分布状况。从石膏自身性质来看,它呈白色粉末状,颗粒较小,且在灌溉水中的溶解度较小,大约为 30 meq/L^[12]。因此,石膏与土壤混合后,小颗粒便会进入土壤孔隙当中,且其溶解度较小,所以在灌水时容易堵塞土壤水分入渗通道,改变土壤结构和孔隙分布状况,进而削弱土壤的入渗能力和土壤的持水能力,减少水分入渗量和土壤剖面的含水率;再利用垂直一维入渗模型分析石膏对土壤水分的影响,进一步验证了石膏可以明显降低土壤水分的导水能力,这一结果与 AL-Kayssi 等^[12]的研究结果一致。由此可见,可以考虑将石膏应用于防止农田水分深层渗漏以及坡地水土流失防治等领域。

4 结论

(1) 在施加石膏前期,其可以有效的削弱土壤的入渗能力,减少土壤的入渗水量,降低入渗速率,而且还可以降低土壤的持水能力,改变土壤水分的分布状况。与对照组相比,随着石膏施量的增加,累积入渗量分别减小了 10.2%,16.15%,30.73%和 40.38%;入渗率分别减小了 18.78%,21.07%,42.13%和 54.82%;土壤剖面含水量显著降低。

(2) 利用垂直一维入渗模型对土壤水分入渗资料拟合求解,拟合效果较好。其结果显示,与对照组相比,随着石膏施量的增加,土壤饱和导水率逐渐减小,且分别减小了 18.42%,36.84%,59.21%和 75%;而非饱和土壤水吸力分配系数 β 与土壤水分特征曲线和非饱和导水率综合形状系数 α 无明显变化规律。

(3) 垂直一维入渗模型可以较好地分析石膏对土壤水分入渗特征的影响。利用垂直一维入渗模型获得土累积入渗量的预测值与重复组累积入渗量的实测数据进行对比分析,其结果显示,累积入渗量的预测值与实测值之间的接近程度较高,相关性很好,决定系数 R^2 均在 0.998 以上,且均方根误差小于 0.5。

[参 考 文 献]

- [1] 付秋萍,张江辉,王全九. 常用潜水蒸发经验公式在新疆地区适用性研究[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(3): 182-188.
- [2] Sahin U, Ero lu S, Sahin F. Microbial application with gypsum increases the saturated hydraulic conductivity of saline-sodic soils [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 48(2):247-250.
- [3] Shaaban M, Abid M, Abou-Shanab R A I. Amelioration of salt affected soils in rice paddy system by application of organic and inorganic amendments [J]. Plant Soil Environment, 2013,59(5):227-233.
- [4] Rasouli F, Pouya A K, Karimian N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum [J]. Geoderma,2013, 193/194(2):246-255.
- [5] Blum J, Caires E F, Ayub R A, et al. Soil chemical attributes and grape yield as affected by gypsum application in Southern Brazil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2011,42(12):1434-1446.
- [6] Mitchell J P, Shennan C, Singer M J, et al. Impacts of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(1):55-71.
- [7] 吕二福良,乌力更. 石膏不同施用方法改良碱化土壤效果浅析[J]. 内蒙古农业大学学报,2003,24(4):130-133.
- [8] 王金满,杨培岭,张建国,等. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J]. 农业工程学报, 2005,21(9):33-37.
- [9] 王全九,邵明安,郑纪勇. 土壤水分运动与溶质迁移[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [10] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [11] 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(3): 188-190.
- [12] AL-Kayssi A W, Mustafa S H. Modeling gypsiferous soil infiltration rate under different sprinkler application rates and successive irrigation events[J]. Agricultural Water Management, 2016,163:66-74.
- [13] 肖波,赵允格,邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2007,23(12):35-40.
- [14] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报,2006,18(3):53-56.