

网络出版时间:2021-11-11 15:22

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.05.016

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20211110.1136.012.html

不同种植年限压砂地土壤水分吸渗特征与 水力学参数

阮晓晗^{1a,1b,2,3}, 白一茹^{1a,2,3}, 王幼奇^{1a,1b,2,3}, 高小龙^{1a,1b,2,3}, 钟艳霞^{1b,2,3}

(1 宁夏大学 a 地理科学与规划学院, b 生态环境学院, 宁夏 银川 750021;

2 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;

3 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

[摘要] 【目的】探究不同种植年限压砂地土壤水分吸渗特征及其水力学参数的变化,为恢复压砂地产能、提升区域生态功能及制定合理灌溉制度提供理论支撑。【方法】以宁夏中卫市不同种植年限(2,5,10,20,30 和 40 a)压砂地为研究对象,利用一维水平土柱吸渗试验,分析不同种植年限压砂地土壤湿润锋深度运移过程和累积入渗量变化规律,采用 Philip 和 Green-Ampt 模型中吸渗率(S)、土壤水分扩散率($\bar{D}$)等参数分析土壤吸渗特征;采用 Brooks-Corey 模型计算土壤水分进气吸力(h_a)和水吸力(h)等水力学参数,进一步推求土壤水分特征曲线,并反演土壤饱和扩散率(D_s)和非饱和扩散率(D)。【结果】相同吸渗时间下,随着种植年限的增加,湿润锋深度、累积入渗量均呈减小趋势。随种植年限的增加,Philip 模型中的 S 和 Green-Ampt 模型中的 $\bar{D}$ 均呈逐渐减小的趋势。Brooks-Corey 模型中,与种植 2 a 压砂地相比,种植 5,10,20,30 和 40 a 压砂地土壤水分的 h_a 分别减小了 1.22%,42.81%,46.37%,55.94%和 64.97%, D_s 分别减小了 27.83%,68.54%,85.40%,90.57%和 93.15%。在相同土壤含水率下,随着种植年限的增加, h 和 D 均呈减小趋势。【结论】在水分吸渗过程中,随着种植年限的增加,压砂地土壤水分入渗能力及持水能力均明显减低。

[关键词] 压砂地土壤;种植年限;水力学参数;一维水平土柱吸渗试验;水分特征曲线

[中图分类号] S152.7

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2022)05-0146-09

Soil moisture absorption characteristics and hydraulic parameters of gravel-sand mulched fields with different planting years

RUAN Xiaohan^{1a,1b,2,3}, BAI Yiru^{1a,2,3}, WANG Youqi^{1a,1b,2,3},
GAO Xiaolong^{1a,1b,2,3}, ZHONG Yanxia^{1b,2,3}

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

Abstract: 【Objective】This study explored soil moisture absorption characteristics and hydraulic parameters of gravel-sand mulched fields with different planting years to provide support for restoring productivity of gravel-sand mulched fields, improving regional ecological functions and formulating a reasonable irrigation system. 【Method】The gravel-sand mulched fields with different planting years in Zhongwei,

[收稿日期] 2021-06-25

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41867003,41761049);宁夏自然科学基金项目(2020AAC03049);宁夏青年科技人才托举工程项目;国家重点研发计划重点项目(2018YFC1802906)

[作者简介] 阮晓晗(1995—),女,陕西商洛人,在读硕士,主要从事土壤水分运动研究。E-mail:rxh0625@163.com

[通信作者] 王幼奇(1980—),男,安徽泾县人,副教授,硕士生导师,主要从事水土资源与环境研究。E-mail:wyq0563@163.com

Ningxia were selected and a one-dimensional horizontal absorption experiment was conducted. The depth of wetting front migration process and variation of cumulative infiltration under gravel-sand mulched fields with different planting years of 2,5,10,20,30 and 40 a were studied. The fitting parameters of Philip and Green-Ampt model were used to analyze soil absorption characteristics such as absorption rate (S) and soil moisture diffusion rate ($\bar{D}$). The Brooks-Corey model was used to calculate hydraulic parameters such as soil water intake suction (h_d) and water suction (h). The soil moisture characteristic curve, soil saturated diffusivity (D_s) and unsaturated diffusivity (D) were also deduced. 【Result】 With the increase of planting years, the depth of wetting front and total cumulative infiltration volume showed a decreasing trend. With the increase of planting years, both S in the Philip model and $\bar{D}$ in the Green-Ampt model showed a decreasing trend. Compared with 2 a, h_d in the Brooks-Corey model under 5 a, 10 a, 20 a, 30 a and 40 a was reduced by 1.22%, 42.81%, 46.37%, 55.94% and 64.97%, respectively, and D_s was reduced by 27.83%, 68.54%, 85.40%, 90.57% and 93.15%, respectively. Under same soil moisture content, h and D decreased with the increase of planting years. 【Conclusion】 As the planting years increased, the soil moisture absorption capacity and water holding capacity of gravel-sand mulched fields in the process of water absorption were significantly reduced.

Key words: gravel-sand mulched fields soil; planting years; hydraulic parameters; one dimensional horizontal soil column absorption experiment; water characteristic curve

压砂地是西北干旱半干旱地区充分利用有限水资源、有效提高作物生产效率的独特旱作农业模式之一^[1]。随着种植年限的增加,压砂地土石介质结构及砾石配比和含量等均发生了改变^[2-3],土壤增渗保墒功能逐渐退化^[4],甚至出现了土壤干燥化现象^[5]。土壤水分是制约干旱半干旱地区农业发展的重要因子,土壤水力学参数是研究土体水分入渗过程、评价水分有效性、确定土壤持水能力等的基础指标^[6-7],对明确土壤水分运动过程、提高水分利用效率等有重要作用。土壤水力学参数主要包括土壤水分特征曲线、土壤饱和导水率、非饱和扩散率、土壤扩散率和比水容重等^[8],其不仅受土壤质地、水分、体积质量和孔隙等本身物理化学性质的影响,还受土壤的砾石量、粒径、厚度、植被类型和种植年限等外在因素的影响^[9-10]。探究不同种植年限压砂地土壤水分吸渗特征及其水力学参数,对压砂地恢复产能、缓解干燥化现象及提升区域生态功能具有重要意义。

一般而言,土壤水分运动的饱和通量可以用渗透率或饱和导水率等参数来表征,但是实际上旱作农业模式下田间土壤水分长时间都处于非饱和状态^[11]。土壤非饱和通量对于农业生产有重要实际意义,但难以直接检测,而饱和通量相对容易检测,因此在土壤水力学参数研究中推求非饱和通量成为研究的热点。当前土壤水力学参数的测算方法通常分为直接法和间接法。直接法一般包括野外测定

法、实验室测定法^[12],其中野外测定法能够客观地反映土体渗透性的实际情况,但该方法存在操作复杂、工作量大、试验周期长、费用高等缺点;相比之下,实验室测定法较为便捷,但无法准确模拟现场条件,难以获取精确结果。由于土壤质地和环境条件的不同,其水分渗透特征会有所差异,异质性明显,因此通过土壤水动力学模型间接地研究和描述不同区域的不同土壤水分运移特征及水力学参数已引起许多学者关注。Shao等^[13]、Wang等^[14]分别基于一维水平土柱吸渗试验推求土壤 Van Genuchten 和 Brooks-Corey 模型参数,并取得了较好效果。Yang等^[15]在一维水平土柱吸渗试验中发现,砾石含量和粒度对水力参数有显著影响,参数与岩石碎块含量呈线性关系。王幼奇等^[16]利用一维垂直和水平吸渗试验研究了生物炭对黑垆土土壤水分运移特征的影响,发现土壤中添加生物炭会显著影响土壤水力学参数。单鱼洋等^[17]通过一维水平土柱吸渗试验发现,不同矿化度微咸水入渗过程中,土壤水分运动参数发生了改变。综上可知,一维水平吸渗试验可以较精确地推求土壤水力学参数,且具有广泛的适用性。目前,针对压砂地土壤水分吸渗特征及非饱和扩散率等非饱和通量的研究较为缺乏,因此有必要对不同种植年限压砂地土壤的水分运动特征进行研究并推求其水力学参数,以明晰不同种植年限压砂地的水力学特征。

本研究采用室内模拟方法进行一维水平土柱吸

渗试验,模拟不同种植年限(2,5,10,20,30 和 40 a)压砂地土壤吸渗过程,获取湿润锋深度和累积入渗量,用 Philip 和 Green-Ampt 入渗模型计算参数,并采用 Brooks-Corey 模型进一步推求不同种植年限压砂地进气吸力和水分扩散率等水力学参数,以及水分特征曲线和非饱和扩散率曲线,以期明确不同种植年限压砂地土壤水力学特征,为水资源的合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区中卫市兴仁镇(105°22'E,36°76'N),地处宁夏中部干旱带,属于旱半干旱气候,海拔 1 680 m 左右,年平均温度 13.4℃,日照时数 2 990 h/年,年平均降水量 240~260 mm,年蒸发量 3 200 mm 左右,无霜期 172 d 左右。光热资源十分丰富,昼夜温差大,是硒砂瓜主产区。土壤类型为灰钙土,土壤砂粒、粉粒和黏粒平均含量

分别为 27.19%,62.52%和 10.26%,属粉壤土;土壤有机质、全氮、全磷和全钾平均含量分别为 6.53,0.51,0.59 和 17.94 g/kg。覆盖砾石来自香山风化碎石,覆盖厚度为 15~25 cm。

1.2 试验材料

2020 年 10 月,在研究区内根据不同种植年限压砂地实际分布面积及比例,在不同种植年限(2,5,10,20,30 和 40 a)压砂地分别均匀选取样点,共计 100 个样点。在各样点随机选取长×宽为 100 cm×100 cm 小区,采集小区砾石覆盖层(0~25 cm)全部砂石,将其风干后用孔径分别为 50,31.5,25,16,10,5 和 2 mm 筛子逐层过筛,对不同粒径的砾石称质量。将覆盖砾石去除杂质和土壤后,清洗、晾干备用。去除各样点表层覆盖砾石后,采集 0~60 cm 土层土壤,清除杂质后自然风干,研磨后过孔径 2 mm 筛备用。不同种植年限压砂地土壤基本物理性质如表 1 所示。

表 1 研究区不同种植年限压砂地土壤基本物理性质

Table 1 Basic soil physical properties of gravel-sand mulched fields with different planting years

种植年限/a Planting year	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³) Soil bulk density	土壤饱和含水率(θ_s)/ (cm ³ ·cm ⁻³) Saturated soil moisture content	土壤初始含水率(θ_i)/ (cm ³ ·cm ⁻³) Initial soil water content	土壤饱和导水率(K_s)/ (cm·min ⁻¹) Soil saturated hydraulic conductivity
2	1.48	0.316	0.008	1.06
5	1.53	0.302	0.008	0.33
10	1.54	0.295	0.008	0.24
20	1.59	0.293	0.007	0.15
30	1.61	0.289	0.006	0.09
40	1.63	0.275	0.005	0.08

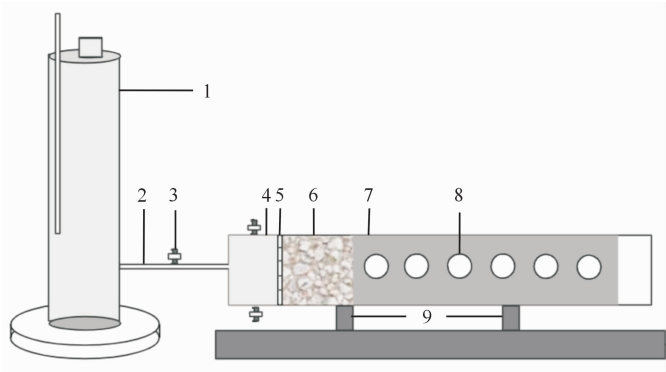
1.3 试验方法

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,模拟不同种植年限(2,5,10,20,30 和 40 a)压砂地土壤水分吸渗过程。一维水平土柱吸渗装置(图 1)由供水装置和水平土柱组成,供水装置选用与水平土柱同等规格(内径 10 cm,高 50 cm)的马氏瓶作为容器,在吸渗过程中时刻保持供水状态。水平土柱前端是一长 3 cm 的储水室,储水室上下分别设有外径为 1 cm 的通气孔和排水口,前端设有进水管用以连通马氏瓶,后端是一水平距离为 50 cm 的开口有机玻璃柱,储水室与水平土柱之间用均匀布有 2 mm 小孔的法兰连接。填装土柱时按照表 2 中不同种植年限压砂地砾石覆盖层砾石粒径配比填装砾石覆盖层,分层(5 cm 一层)填装 15 cm。然后按照当地不同种植年限压砂地实际测得的土壤体

积质量(表 1)填装土层,分层(5 cm 一层)填装 30 cm,土层与土层之间进行打毛处理。砾石覆盖层与土层深度共计 45 cm。试验开始前,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上面持平,同时关闭进水口阀门。试验开始后,先打开进水口阀门,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储水室阀门,记录马氏瓶水位的初始刻度,吸渗过程中分时间段读取不同时刻马氏瓶水位刻度及湿润锋刻度,在前 5 min 内每隔 10 s 记录 1 次,5~8 min 每 30 s 记录 1 次,8~15 min 每 1 min 记录 1 次,15~30 min 每 5 min 记录 1 次,30~60 min 每 10 min 记录 1 次,60~240 min 每 30 min 记录 1 次,之后每隔 60 min 记录 1 次,当湿润锋运移到 45 cm 时停止供水,试验结束。以马氏瓶水位变化计算土壤累积入渗量及入渗速率,以湿润锋刻度变化表示湿润锋深度。

表 2 研究区不同种植年限压砂地砾石粒径(D)配比

种植年限/a Planting year	$D>50\text{ mm}$	$31.5<D\leq 50\text{ mm}$	$25<D\leq 31.5\text{ mm}$	$16<D\leq 25\text{ mm}$	$10<D\leq 16\text{ mm}$	$5<D\leq 10\text{ mm}$	$2<D\leq 5\text{ mm}$	$D\leq 2\text{ mm}$
2	5.12	4.98	6.26	8.97	15.01	18.35	23.02	27.61
5	4.57	5.19	5.67	8.43	12.38	16.04	25.73	35.71
10	4.07	4.58	5.77	8.41	13.30	16.92	27.63	36.16
20	3.53	4.55	5.76	8.30	13.08	16.42	25.67	36.72
30	1.68	2.61	5.12	7.17	14.91	18.73	28.83	36.88
40	0.95	2.25	4.06	6.38	14.02	17.63	25.16	39.16



1. 马氏瓶;2. 进水口;3. 阀门;4. 储水室;5. 法兰;6. 砾石层;7. 土层;8. 取土孔;9. 水平支架
1. Mariotte bottle;2. ;3. Valve;4. Water storage chamber;5. Flange;6. Gravel layer;7. Soil layer;8. Sampling hole;9. Horizontal support
图 1 一维水平土柱吸渗试验装置
Fig. 1 One-dimensional horizontal soil column absorption device

1.4 土壤水分吸渗模型参数

分别采用 Philip 模型^[18]和 Green-Ampt 模型^[19]来拟合不同种植年限压砂地土壤水分的吸渗特征。

Philip 模型为：
$$I = St^{0.5}。$$
(1)
式中： I 为累积入渗量,cm; S 为吸渗率,cm/min^{0.5}; t 为吸渗时间,min。

Green-Ampt 模型为：
$$i = K_s \frac{Z_f + S_f + H_0}{Z_f}。$$
(2)

式中： i 为吸渗速率,cm/min; K_s 为土壤饱和导水率,cm/min; Z_f 为湿润锋深度,cm; S_f 为湿润锋面吸力,cm; H_0 为土柱表面积水深度,cm。

由于土柱吸渗试验是在一维水平条件下进行的,因此忽略重力势能的影响,式(2)可以简化为：

$$i = K_s \frac{S_f}{Z_f}。$$

(3)

在以上研究的基础上,参考文献[20]将 Green-Ampt 模型湿润区某种平均的或有效的土壤水分扩散率($\bar{D}$,cm²/min)表示为：

$$\bar{D} = \frac{K_s S_f}{\theta_s - \theta_i}。$$

(4)

式中： θ_s 为土壤饱和含水率,cm³/cm³; θ_i 为土壤初始含水率,cm³/cm³。

1.5 土壤水力学参数模型

Brooks-Corey 模型反映了土壤含水率、水吸力、饱和导水率及非饱和导水率之间的关系,可拟合土壤水分特征曲线和水力学参数,其表达式如下：

$$S_e = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (\frac{h_d}{h})^n, & h \geq h_d; \\ 1, & h < h_d。 \end{cases}$$

(5)

$$K(h) = K_s (\frac{h_d}{h})^m = K_s S_e^{\frac{m}{n}}。$$

(6)

式中： S_e 为土壤有效饱和度; θ 为土壤含水率,cm³/cm³; θ_r 为土壤滞留含水率,当土壤初始含水率较低时,认为滞留含水率与初始含水率相等,cm³/cm³; h_d 为进气吸力,cm; h 为土壤水吸力,cm; n 为形状系数; $K(h)$ 为非饱和导水率,cm/min; m 为经验参数, $m = 3n + 2$ 。

参考文献[14],根据一维水平吸渗试验推求 Brooks-Corey 模型参数,计算公式如下：

$$n = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_r}{A_1} - 1},$$

(7)

$$\alpha = 1 - (\frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r})^{\frac{1}{n^2}},$$

(8)

$$h_d=\frac{A_2}{anK_s}。$$
 (9)

式中: a 为参数,当土壤初始含水率很小时,近似为 1; A_1 、 A_2 为参数,可以由一维水平土柱吸渗试验中的累积入渗量(I)、吸渗速率(i)和湿润锋深度(Z_f)拟合获得。

$$A_1=Z_f/I,$$
 (10)

$$A_2=Z_f i。$$
 (11)

参考文献[21],利用 Brooks-Corey 模型与一维水平吸渗控制方程来推求土壤水分饱和和扩散率和非饱和和扩散率,计算公式如下:

$$D_s=\frac{A_1 A_2}{(\theta_s-\theta_r)(\theta_s-\theta_r-A_1)},$$
 (12)

$$L=\frac{A_1}{\theta_s-\theta_r-A_1}-1,$$
 (13)

$$D=D_s(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r})^L。$$
 (14)

式中: D_s 为土壤饱和和扩散率,cm²/min; L 为参数; D 为土壤非饱和和扩散率,cm²/min。

2 结果与分析

2.1 不同种植年限压砂地土壤水分的吸渗特征

根据一维水平土柱吸渗试验获取不同种植年限

压砂地土壤水分累积入渗量及湿润锋深度随吸渗时间的变化,结果见图 2。图 2 显示,相同吸渗时间下,随着种植年限的增加,湿润锋深度、累积入渗量均呈减小趋势,表明土壤水分入渗能力明显降低。各种植年限土壤的水分累积入渗量均随着吸渗时间的延长而增加,但不同吸渗时间下累积入渗量的增幅有差异,其中在初始吸渗阶段(0~60 min)累积入渗量增幅均较大,进入稳渗阶段(60 min 以后)后增幅均较小。试验结束时,与种植 2 a 的压砂地相比,种植 5,10,20,30 和 40 a 压砂地土壤水分累积入渗量分别减小了 4.36%,5.82%,7.04%,8.88%和 12.48%。可知累积入渗量与吸渗时间呈正相关,与种植年限呈负相关。

图 2 显示,随着吸渗时间的延长,各种植年限土壤湿润锋深度均呈增加的趋势。在吸渗初始阶段,各种植年限压砂地土壤湿润锋深度差异不大,之后随着吸渗时间的继续延长,土壤湿润锋深度差异增大。试验结束时,与种植 2 a 的压砂地相比,种植 5,10,20,30 和 40 a 压砂地土壤湿润锋深度达到最大(45 cm)时所需的时间分别增加了 37.50%,87.50%,106.25%,125.00%和 137.50%。

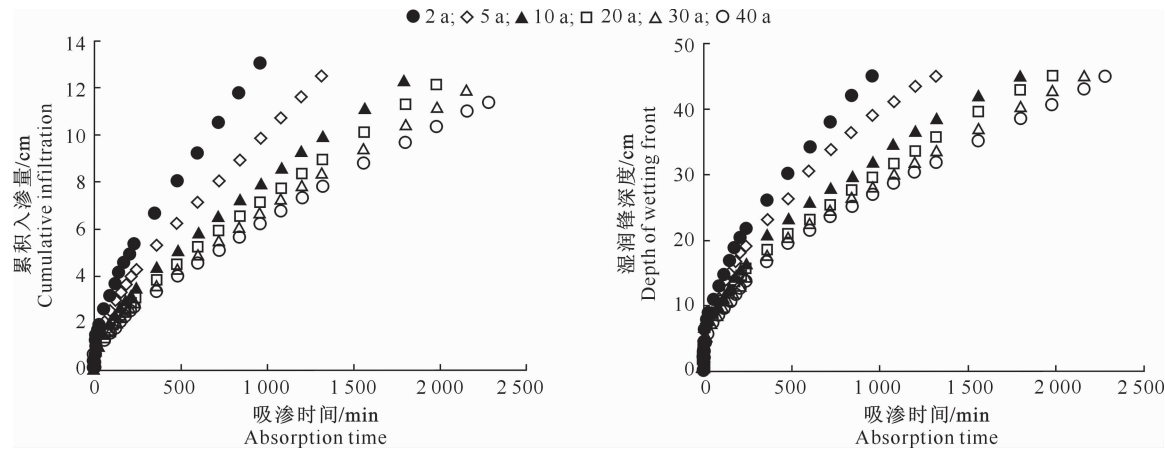


图 2 不同种植年限压砂地土壤水分累积入渗量和湿润锋深度随吸渗时间的变化

Fig. 2 Variation of cumulative infiltration and depth of wetting front with absorption time of gravel-sand mulched fields with different planting years

2.2 基于 Philip 和 Green-Ampt 模型的不同种植年限压砂地土壤水分吸渗参数

吸渗率(S)指土壤依靠毛管吸收或释放溶液的能力,是反映土壤渗透能力的重要指标^[22]。根据吸渗速率与时间数据拟合 Philip 模型中的吸渗率,结果(表 3)显示,与种植 2 a 的压砂地相比,种植 5,10,20,30 和 40 a 压砂地土壤水分的 S 分别减小了

0.152,0.306,0.386,0.429 和 0.467 cm/min^{0.5},表明随着种植年限的增加,土壤 S 逐渐减小,土壤水分渗透能力减弱。土壤水分扩散率($\bar{D}$)是表征土壤水分扩散和溶质弥散的重要物理量。由表 3 可知,不同种植年限压砂地的 $\bar{D}$ 由大到小表现为 2 a>5 a>10 a>20 a>30 a>40 a,表明随着种植年限的增加,土壤水分扩散能力减弱。

表 3 基于 Philip 和 Green-Ampt 模型的不同种植年限压砂地土壤水分吸渗参数

Table 3 Soil moisture absorption parameters of gravel-sand mulched fields with different planting years based on Philip and Green-Ampt model

吸渗模型 Absorption model	参数 Parameter	种植年限/a Planting year					
		2	5	10	20	30	40
Philip 模型 Philip model	$S/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5})$	0.564	0.412	0.258	0.178	0.135	0.097
	R^2	0.959	0.949	0.986	0.937	0.839	0.893
Green-Ampt 模型 Green-Ampt model	$\bar{D}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	2.036	1.842	0.861	0.504	0.307	0.154
	R^2	0.958	0.944	0.974	0.935	0.776	0.772

2.3 基于 Brooks-Corey 模型的不同种植年限压砂地土壤水力学参数

采用 Brooks-Corey 模型获取不同种植年限压砂地的土壤水力学参数,结果见表 4。由表 4 可知, A_1 、 A_2 随种植年限的增加总体上均呈减小趋势,表明随着种植年限的增加,土壤湿润锋运移至相同深度时,累积入渗量逐渐减小,且吸渗速率逐渐减慢。

表 4 基于 Brooks-Corey 模型的不同种植年限压砂地土壤水力学参数

Table 4 Soil hydraulic parameters of gravel-sand mulched fields with different planting years based on Brooks-Corey model

种植年限/a Planting year	模型参数 Model parameter					
	A_1	A_2	n	h_d/cm	$D_s/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	L
2	0.257	0.666	0.46	3.81	10.059	3.714
5	0.245	0.423	0.45	3.76	7.260	4.049
10	0.245	0.154	0.41	2.18	3.165	4.882
20	0.244	0.073	0.42	2.04	1.469	4.777
30	0.244	0.043	0.40	1.68	0.949	5.201
40	0.240	0.024	0.36	1.33	0.689	6.852

2.4 种植年限对土壤水分特征曲线和非饱和扩散率的影响

土壤水吸力又称水势,是指土壤水的负压力,可表征土壤基质对水分的吸附能力^[23]。非饱和扩散率是分析非饱和状态下土壤水分传导能力的重要参数之一,反映了在水平方向上土壤水分的运移轨迹以及含水量随时间的变化情况^[8]。为了进一步明确不同种植年限对土壤水分特征曲线和非饱和扩散率的影响,将表 4 中的参数代入公式(5)和(14)中,可获得不同种植年限压砂地土壤水吸力(h)及土壤非饱和扩散率(D)与土壤含水率(θ)的关系。由图 3 可以看出,土壤水吸力随着含水率的增加而迅速降低,种植年限越长水分特征曲线降低越快,且在相同土壤含水率下,种植年限越大,土壤水吸力越小,土壤持水能力越差。此外,当 h 为 1 000 cm 时,不同种植年限压砂地土壤的含水率由大到小表现为 2 a ($0.034 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) > 5 a ($0.025 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) > 10 a ($0.024 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) > 30 a ($0.023 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) > 20 a ($0.022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) > 40 a ($0.016 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$),可知在土壤水吸力相同的条件下,种植年限越大,土壤含水率越低。

由表 4 还可知,与种植 2 a 压砂地相比,种植 5,10,20,30 和 40 a 压砂地土壤水分的 h_d 分别减小了 1.22%,42.81%,46.37%,55.94%和 64.97%, D_s 分别减小了 27.83%,68.54%,85.40%,90.57%和 93.15%。随着种植年限的增加, h_d 、 n 和 D_s 均呈减小趋势,参数 L 无明显变化规律。

由图 4 可以看出, D 随着 θ 的增加而增大,且种植年限越小 D 增长越快;当 θ 为 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,与种植 2 a 压砂地相比,种植 5,10,20,30 和 40 a 压砂地的 D 分别减小了 33.25%,67.45%,84.42%,89.06%和 88.05%,可知在相同土壤含水率下,随着种植年限的增大,土壤非饱和扩散率整体呈减小趋势。

3 讨 论

土壤水分入渗特性是研究土壤水分有效性、确定灌溉定额和推广节水灌溉理论的重要依据之一^[24]。本研究中,相同吸渗时间下,随着种植年限的增加,湿润锋深度、累积入渗量均呈减小趋势,表明土壤水分入渗能力明显降低。其原因主要是随着种植年限的增大,压砂地砾石覆盖层的土石混合配比发生了改变,粒径小于 5 mm 的砾石及细土比例增多,减小了土壤孔隙数量,导致水分在砂层和土壤中滞留的时间增加,从而使进入下层土壤的水分减少。此外,随着种植年限的增加,压砂地土壤体积质量逐渐增大,土壤变得紧密坚实,土石混合介质中孔隙数量逐渐减少,内部连通性变差,当土体湿润后膨

胀会导致土体内部的孔隙进一步减小,土体中气体排出困难,从而使土壤水分吸渗受到了较大的气相阻力,吸渗过程变慢。李涛^[25]等、张宏媛等^[26]和李

卓等^[27]的研究均表明,土壤孔隙度减小、土壤体积质量增大能显著减慢土壤水分入渗过程,降低土壤水分入渗能力,这与本研究结果一致。

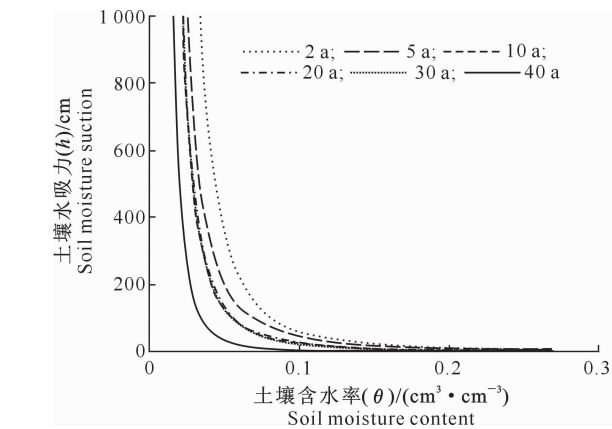


图 3 不同种植年限压砂地土壤水吸力与含水率的关系
Fig. 3 Soil moisture characteristic curves of gravel-sand mulched fields with different planting years

土壤水力学参数对于灌溉调度、农田土水分运动过程以及田间或流域尺度的水平衡等研究非常重要^[28]。本研究中,随着种植年限的增加,压砂地土壤 θ_s 、 K_s 、 h_d 、 D_s 均呈减小趋势,即土壤导水、导气、持水能力和水分扩散能力变差。这是由于随着种植年限的增加,压砂地土壤压实程度增大,导致土壤结构变差;此外,在作物根系长期吸水的作用下,土壤干燥化程度加剧,从而出现了土壤体积质量变大、孔隙度变小、易板结的现象,使得土壤水分的扩散和传输受到了明显的阻滞。由本研究的土壤非饱和和扩散率曲线可知,当土壤含水率较低时,土壤非饱和和扩散率趋近于 0,当土壤含水率增大到一定程度后其水分才开始扩散,并且土壤非饱和和扩散率随着含水率的增大而明显增加。这主要是在土壤水分吸渗过程中,渗入土壤的水分首先被土壤颗粒表面吸持成为膜状水,当膜状水饱和后再进入土壤细小孔隙,然后才成为自由水继续扩散^[20]。由本研究的土壤水分特征曲线可知,相同土壤含水率下,种植年限越长,土壤水吸力越弱,持水能力越差。这是由于种植年限越长,土壤体积质量越大、孔隙度越小,导致土壤结构及持水性能明显退化。José 等^[29]研究也发现,与免耕土壤相比,长期耕作土壤结构更加紧密,土壤持水性能更差,这与本研究结果一致。

本研究采用一维水平土柱吸渗试验,基于 Brooks-Corey 模型获取了不同种植年限压砂地土壤的水力学参数,该参数在一定程度上反映了不同种植年限压砂地土壤的水分运动状况。在将来的研究

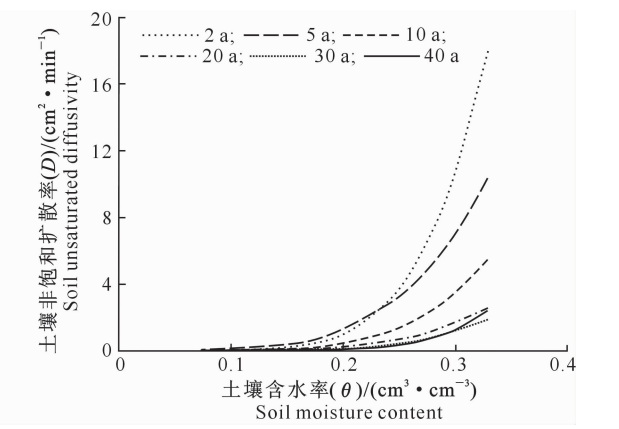


图 4 不同种植年限压砂地土壤非饱和和扩散率与含水率的关系
Fig. 4 Curves of unsaturated soil unsaturated diffusivity of gravel-sand mulched fields with different planting years

中,应结合一维水平土柱吸渗试验和 Van Genuchten 模型,获取更多具有物理意义的水力学参数,以便于明晰水分特征曲线变化机理。

4 结 论

1)在相同吸渗时间下,随着种植年限的增加,湿润锋深度、累积入渗量均呈减小趋势,可知种植年限的增加减缓了土壤水分吸渗过程,土壤水分入渗能力明显降低。

2)在 Philip 模型中,不同种植年限压砂地土壤水分吸渗过程中的吸渗率差异较大,表现为 2 a ($0.564 \text{ cm/min}^{0.5}$) > 5 a ($0.412 \text{ cm/min}^{0.5}$) > 10 a ($0.258 \text{ cm/min}^{0.5}$) > 20 a ($0.178 \text{ cm/min}^{0.5}$) > 30 a ($0.135 \text{ cm/min}^{0.5}$) > 40 a ($0.097 \text{ cm/min}^{0.5}$)。Green-Ampt 模型中,土壤水分扩散率随着种植年限的增加而减小。

3)Brooks-Corey 模型中,种植年限对压砂地土壤水力学参数有明显影响。随着种植年限的增加,进气吸力和土壤饱和扩散率均呈减小趋势。在相同含水率条件下,随种植年限的增加,土壤水吸力和非饱和和扩散率均减小,持水能力降低。

[参考文献]

[1] 白一茹,赵云鹏,王幼奇,等. 宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入渗过程及模型分析 [J]. 水土保持学报,2017,31(4):81-85.
Bai Y R, Zhao Y P, Wang Y Q, et al. Soil infiltration process and model analysis of field mulched with different thickness of gravel-sand in Ningxia [J]. Journal of Soil and Water Conser-

- vation, 2017, 31(4): 81-85.
- [2] 谭军利, 王西娜, 田军仓, 等. 压砂地砂层持水特性研究 [J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 319-325.
Tan J L, Wang X N, Tian J C, et al. Water retention characteristics of gravel-sand stratum on the gravel-sand mulched field [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 319-325.
- [3] 赵文举, 李娜, 李宗礼, 等. 不同种植年限压砂地土壤水分空间变异规律研究 [J]. 农业现代化研究, 2015, 36(6): 1067-1073.
Zhao W J, Li N, Li Z L, et al. Study on spatial variability of soil water content in gravel-mulched fields with different planting years [J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(6): 1067-1073.
- [4] 李王成, 王帅, 王兴旺. 砂田抑制蒸发功能随覆砂年限的演变规律 [J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 83-89.
Li W C, Wang S, Wang X W. Service life of the gravel-sand mulch in reducing soil evaporation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 83-89.
- [5] 赵云鹏, 白一茹, 陆学娥, 等. 宁夏不同种植年限下晒砂瓜土壤干燥化效应研究 [J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 273-279.
Zhao Y P, Bai Y R, Lu X E, et al. Effects of different growth years of watermelon on soil desiccation in gravel-sand mulched field in Ningxia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 273-279.
- [6] Owuor S O, Butterbach-Bahl K, Guzha A C, et al. Conversion of natural forest results in a significant degradation of soil hydraulic properties in the highlands of Kenya [J]. Soil and Tillage Research, 2018(176): 36-44.
- [7] Cui F, Bao J, Cao Z, et al. Soil hydraulic parameters estimation using ground penetrating radar data via ensemble smoother with multiple data assimilation [J]. Journal of Hydrology, 2020 (583): 124552.
- [8] 辜婧瑶, 邦阳戈, 魏玉杰, 等. 崩岗不同土层土壤水力学特性差异性分析 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 61-67.
Gu J Y, Yang B G, Wei Y J, et al. Analysis on the difference of soil hydraulic properties in different soil layers of Benggang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 61-67.
- [9] Gao Y, Li Z, Sun D A, et al. A simple method for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils with different void ratios [J]. Soil and Tillage Research, 2021(209): 104913.
- [10] 赵云鹏, 白一茹, 王幼奇, 等. 城市绿地覆盖砂石后土壤水分入渗过程及模型分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 66-72.
Zhao Y P, Bai Y R, Wang Y Q, et al. Investigating and modeling soil infiltration process with gravel mulch on urban green space [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45(7): 66-72.
- [11] 麦荣幸, 康跃虎, 裴亮, 等. 精准滴灌农田排水过程数值模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 247-254.
Mai R X, Kang Y H, Pei L, et al. Numerical simulation of drainage process under precision drip irrigation field [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(5): 247-254.
- [12] 刘建立, 徐绍辉. 土壤水力性质确定方法研究进展 [J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 394-401.
Liu J L, Xu S H. Advances in approaches for determining unsaturated soil hydraulic properties [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 394-401.
- [13] Shao M, Horton R. Integral method for estimating soil hydraulic properties [J]. Soil science Society of America Journal, 1998(3): 585-592.
- [14] Wang Q J, Robert H, Shao M A. Horizontal infiltration method for determining Brooks-Corey model parameters [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002(6): 1733-1739.
- [15] Yang Y, Wang Q, Zhuang J. Estimating hydraulic parameters of stony soils on the basis of one-dimensional water absorption properties [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 2013(4): 304-313.
- [16] 王幼奇, 包维斌, 白一茹, 等. 生物炭对黑垆土土壤水分运移特征参数影响 [J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(3): 292-297.
Wang Y Q, Bao W B, Bai Y R, et al. Effects of biochar on soil water transport characteristics of Heilu soil [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(3): 292-297.
- [17] 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.
Shan Y Y, Li X J, Wang Q J, et al. Analysis of one-dimensional horizontal absorption characteristics and water movement parameters of magnetized brackish water [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 266-274.
- [18] Philip J R. The theory of infiltration: I. the infiltration equation and its solution [J]. Soil Science, 1957, (5): 345-357.
- [19] 郭向红, 孙西欢, 马娟娟, 等. 不同入渗水头条件下的 Green-Ampt 模型 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 64-68.
Guo X H, Sun X H, Ma J J, et al. Green-Ampt model of different infiltration heads [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3): 64-68.
- [20] 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.
Lei Z D, Yang S X, Xie S Z. Soil water dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University, 1988.
- [21] Wang Q, Shao M, Horton R. A simple method for estimating water diffusivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 713-718.
- [22] 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.
Li S L, Wang X, Wang S, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 135-144.
- [23] 范严伟, 赵彤, 白贵林, 等. 水平微润灌湿润体 HYDRUS-2D

- 模拟及其影响因素分析 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 115-124.
- Fan Y W, Zhao T, Bai G L, et al. HYDRUS-2D simulation of soil wetting pattern with horizontal moistube-irrigation and analysis of its influencing factors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 115-124.
- [24] 仵 峰, 张 凯, 宰松梅, 等. 小麦玉米秸秆还田量对土壤水分运动特性的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 101-105.
- Wu F, Zhang K, Zai S M, et al. Impact of mixed straw on soil hydraulic properties [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 101-105.
- [25] 李 涛, 张建丰, 张江辉. 不同容重条件下深层坑灌土壤水分运动的数值模拟 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 227-234.
- Li T, Zhang J F, Zhang J H. Study on numerical simulation of soil water movement under the condition of deep pit infiltration irrigation with different soil bulk densities [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2011, 39(4): 227-234.
- [26] 张宏媛, 逢焕成, 卢 闯, 等. CT 扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 114-122.
- Zhang H Y, Feng H C, Lu C, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(6): 114-122.
- [27] 李 卓, 吴普特, 冯 浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 40-45.
- [28] Lu Y, Liu S, Zhang Y, et al. Hydraulic conductivity of gravelly soils with various coarse particle contents subjected to freeze-thaw cycles [J]. Journal of Hydrology, 2021(598): 126302.
- [29] José M R, Vanderleia T D R, Eduardo S V, et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic [J]. Soil & Tillage Research, 2016(158): 123-136.
- (上接第 138 页)
- [42] Chen P, Liu Q Z. Genome-wide characterization of the WRKY gene family in cultivated strawberry (*Fragaria × Ananassa* Duch.) and the importance of several group III members in continuous cropping [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 8423.
- [43] Gao Q M, Venugopal S, Navarre D, et al. Low oleic acid-derived repression of jasmonic acid-inducible defense responses requires the WRKY50 and WRKY51 proteins [J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 464-476.
- [44] Wang Y, Cui X, Yang B, et al. WRKY55 transcription factor positively regulates leaf senescence and the defense response by modulating the transcription of genes implicated in the biosynthesis of reactive oxygen species and salicylic acid in *Arabidopsis* [J]. Development, 2020, 147(16): dev189647.
- [45] Bhattarai K K, Atamian H S, Kaloshian I, et al. WRKY72-type transcription factors contribute to basal immunity in tomato and *Arabidopsis* as well as gene-for-gene resistance mediated by the tomato *R* gene *Mi-1* [J]. The Plant Journal, 2010, 63(2): 229-240.
- [46] Chakraborty J, Ghosh P, Sen S, et al. Epigenetic and transcriptional control of chickpea WRKY40 promoter activity under *Fusarium* stress and its heterologous expression in *Arabidopsis* leads to enhanced resistance against bacterial pathogen [J]. Plant Science, 2018, 276: 250-267.
- [47] Asai T, Tena G, Plotnikova J, et al. MAP kinase signalling cascade in *Arabidopsis* innate immunity [J]. Nature, 2002, 415(6875): 977-983.
- [48] Sarowar S, Alam S T, Makandar R, et al. Targeting the pattern-triggered immunity pathway to enhance resistance to *Fusarium graminearum* [J]. Molecular Plant Pathology, 2019, 20(5): 626-640.
- [49] Lai Z, Vinod K, Zheng Z, et al. Roles of *Arabidopsis* WRKY3 and WRKY4 transcription factors in plant responses to pathogens [J]. BMC Plant Biology, 2008, 8: 68.
- [50] Hussain R M F, Sheikh A H, Haider I, et al. *Arabidopsis* WRKY50 and TGA transcription factors synergistically activate expression of PR1 [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 930.
- [51] Wei T, Ou B, Li J B, et al. Transcriptional profiling of rice early response to *Magnaporthe oryzae* identified OsWRKYs as important regulators in rice blast resistance [J]. PLoS ONE, 2013, 8(3): e59720.
- [52] Proietti S, Bertini L, Ent S, et al. Cross activity of orthologous WRKY transcription factors in wheat and *Arabidopsis* [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(6): 1975-1990.
- [53] Jiang Y, Yu D. The WRKY57 transcription factor affects the expression of Jasmonate ZIM-domain genes transcriptionally to compromise *Botrytis cinerea* resistance [J]. Plant Physiology, 2016, 171(4): 2771-2782.