

宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入渗过程及模型分析

白一茹^{1,2}, 赵云鹏^{1,2}, 王幼奇^{1,2}, 张兴^{1,2}

(1. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021; 2. 宁夏(中阿)旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021)

摘要: 以宁夏中部旱区砂田土壤为研究对象, 通过对不同砾石覆盖厚度条件下砂田土壤水分入渗过程进行研究, 采用一维垂直定水头入渗法, 选取砾石覆盖厚度为影响因子, 设置5个覆盖厚度(0, 6, 9, 12, 15 cm), 观测湿润锋运移和入渗量变化规律, 比较各处理土壤入渗特征, 利用模型拟合土壤入渗过程。结果表明, 砾石覆盖提高了土壤水分入渗能力, 土壤湿润锋运移距离和入渗量明显增加。与CK相比, 砾石覆盖厚度为6, 9, 12, 15 cm时的累积入渗量分别增加了4.3%, 11.8%, 12.8%和17.1%, 平均入渗率增加了25.8%, 38.7%, 50.0%和62.9%; 同时砾石覆盖厚度改变了土壤水分入渗曲线, 随着砾石覆盖厚度增加, 土壤初始入渗率迅速增加, 但稳定入渗率增加较为缓慢。与CK相比, 砾石覆盖厚度为6, 9, 12, 15 cm时的初始入渗率分别增加了40%, 81%, 91%和110%; 稳定入渗率分别增加了15.3%, 17.9%, 20.5%和25.6%。利用3种入渗模型对砂田土壤水分入渗过程进行拟合, 结果表明 Horton 模型拟合效果最好, 是分析和预测不同砾石覆盖厚度土壤水分入渗过程的适宜模型。

关键词: 砂田; 土壤入渗; 砾石厚度; 模型分析; 宁夏

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0081-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.014

Soil Infiltration Process and Model Analysis of Field Mulched with Different Thickness of Gravel-Sand in Ningxia

BAI Yiru^{1,2}, ZHAO Yunpeng^{1,2}, WANG Youqi^{1,2}, ZHANG Xing^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Ningxia

(China-Arab) Key Laboratory of Resource Assessment and Environment Regulation in Arid Region, Yinchuan 750021)

Abstract: Soil water infiltration process of field mulched by different thickness of gravel-sand in arid area of central Ningxia was studied by one-dimensional vertical water infiltration method. This study selected the gravel-sand thickness as the impact factor, and set five levels of thickness (0, 6, 9, 12, and 15 cm). The variation laws of wetting front movement and infiltration amount were observed, the infiltration characteristics of each treatment were compared, and the infiltration process was simulated using model fitting in this study. The results indicated that gravel-sand mulching improved soil water infiltration capacity, soil wetting front distance and infiltration volume increased significantly. Compared with CK, the cumulative infiltration increased by 4.3%, 11.8%, 12.8% and 17.1% under gravel-sand thickness of 6, 9, 12 and 15 cm, respectively, and average infiltration rate increased by 25.8%, 38.7%, 50.0% and 62.9%, respectively. Meanwhile, gravel-sand mulching changed the soil water infiltration curve. As the increasing of the gravel-sand thickness, the initial infiltration rate grew rapidly, while the steady infiltration rate increased slowly. Compared with CK, the initial infiltration rate raised by 40%, 81%, 91% and 110% under gravel-sand thickness of 6, 9, 12 and 15 cm, respectively, and the steady infiltration rate increased by 15.3%, 17.9%, 20.5% and 25.6%, respectively. The Kostiakov model, Horton model and Philip model were used to simulate the soil infiltration process, and the results indicated that Horton model fit better ($R^2 > 0.98$) than the rest two models, and it was more suitable to analyze and predict the soil infiltration process under different thickness of gravel-sand mulching in the northwestern arid area.

Keywords: gravel-sand mulched field; soil infiltration; thickness of gravel-sand; model analysis; Ningxia

收稿日期: 2017-03-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(41461104); 宁夏自然科学基金项目(NZ16026)

第一作者: 白一茹(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要从事旱区水土资源调控研究。E-mail: yr0823@163.com

通信作者: 王幼奇(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: wyq0563@163.com

宁夏砂田集中分布在宁夏中部旱区,该区属荒漠草原气候带,降水少且分布不均,田间蒸发量大,土壤含水量低,干旱缺水是导致该区域作物生产力和水分利用效率低的关键因素之一^[1]。因此发展以充分利用有限降水资源为中心的保墒蓄水技术是提高砂田生产力的重要途径之一。砂田是当地农民为对抗恶劣自然环境,利用砾石作为覆盖材料,依赖天然降水创造出的一种西北独特的旱作覆盖保护性耕作方式^[2-3]。由于砂田表面大量砾石的存在,不仅具有蓄水保墒、防止水土流失和提高土壤温度的作用,同时也会对土壤水分入渗过程产生影响^[4-5]。一般而言,土壤表面砾石存在会改变过水断面大小,影响土壤水分运动通道,其水分入渗过程较均质土壤更为复杂^[6-8]。因此国内外众多学者对不同区域砾石覆盖土壤的入渗过程进行大量研究,如在北京山区,梁洪儒等^[9]研究发现随着砾石覆盖的增加,土壤入渗能力增强,坡面产流产沙量显著降低。在三峡库区,王小燕等^[8]通过模拟降雨试验研究砾石覆盖度对降雨入渗和地表产流的影响,表明随砾石覆盖度增加入渗速率明显增加。在喀斯特地区,党宏宇^[10]通过室内土柱模拟碎石覆盖条件下水分入渗过程,发现碎石覆盖率与湿润锋进程和累积入渗量呈正相关关系。在我国西南半湿润环境下,Wang 等^[11]研究得出覆盖地表的岩块能明显影响坡耕地土壤水文过程,增加入渗和地下径流,其覆盖量和土壤流失率呈递减指数关系。在西班牙西南部,Zavala 等^[12]得出土壤表层覆盖的岩石碎片能起到增加入渗、降低稳定径流率和土壤流失量及改善土壤侵蚀的作用。综上所述,在很多区域关于砾石覆盖土壤的入渗过程研究都较为系统深入,而针对宁夏砂田砾石覆盖厚度对土壤水分入渗过程的影响还缺乏定量研究,且对入渗模型的适应性评价方面的研究更少。

本文选取宁夏中卫砂田土壤及其表面覆盖砾石,在室内采用一维垂直定水头法,分析砾石覆盖厚度对入渗过程及特征的影响,揭示不同砾石厚度下入渗率和湿润锋变化,评价不同入渗模型在砂田土壤的适应性。研究可为深入认识砂田土壤水分运动过程提供数据支持,对西北旱区水资源高效利用和砂田农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

试验区位于宁夏回族自治区中卫市喊叫水乡(105°36'E,37°29'N),海拔 1 428~1 550 m,为典型的温带大陆性气候,夏季酷热,冬季寒冷,气候干燥,

年均气温 9.5℃,年均降水量 202 mm,年日照时数 2 845 h,蒸发量 1 947 mm,无霜期 159~169 d,光热资源十分丰富。2016 年 10 月在地块平整的砂田采集土壤和砾石样品,砂田种植作物为晒砂瓜,土壤属灰钙土,覆盖砾石来自香山风化碎石,粒径为 15~25 mm。采集表层 0—50 cm 土样,经风干、研磨、剔除杂物后过 2 mm 筛。

1.2 土壤入渗测定方法

2016 年 11 月在室内采用一维垂直定水头法测定砾石覆盖土壤入渗过程,试验选用内径 15 cm,高 70 cm,厚 1 cm 的有机玻璃柱。其底部分布若干个半径为 2 mm 的细孔,方便排水。在土柱底部装 5 cm 厚 2~5 mm 砾石并在其上层铺薄层纱布以防止土粒落入。试验使用内径为 19 cm,高为 45 cm 的圆柱体马氏瓶供水,为减少积水水头变化对入渗过程的影响,所有处理的供水水头控制在 5 cm。

将土样按该地区土壤平均容重(1.45 g/cm³)分层(每层 5 cm)装入土柱中,为防止分层,将层间打毛。装填到 40 cm 后,将砾石按厚度为 0,6,9,12,15 cm 覆盖于土壤表层,共 5 个处理,其中 0 cm 即无覆盖为对照(CK),每个处理重复 3 次,共进行了 15 次试验。在试验过程中,记录马氏瓶水位高度和湿润锋进程,在前 5 min 内,每隔 1 min 记录 1 次;5~30 min 内,每隔 5 min 记录 1 次;30~140 min 以后每隔 10 min 记录 1 次;140 min 以后每隔 30 min 记录 1 次,直至湿润锋运移到土柱底部为止。

1.3 入渗模型

参考和借鉴相关研究结果,选用 Kostiakov、Horton 和 Philip 模型对砂田砾石覆盖土壤入渗过程进行模拟^[13],并对 3 种模型的适用性进行评价。

Kostiakov 模型:

$$f(t) = at^{-b} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率/(mm/min); t 为入渗时间/min; a 、 b 为根据试验求得的模型参数。

Horton 模型:

$$f(t) = f_c + (f_1 - f_c)e^{-kt} \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率/(mm/min); t 为入渗时间/min; f_1 为初始入渗率/(mm/min); f_c 为稳定入渗率/(mm/min); k 为试验求得的参数。

Philip 模型:

$$f(t) = 0.5st^{-0.5} + f_c \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率/(mm/min); t 为入渗时间/min; f_c 为稳定入渗率/(mm/min); s 为根据试验求得的模型参数。

1.4 数据分析

利用 Origin 8.0、SPSS 20 和 Excel 2003 进行土

壤入渗过程模拟和数据分析。

2 结果与分析

2.1 砾石覆盖厚度对湿润锋运移的影响

不同砾石覆盖厚度土壤的湿润锋运移随入渗时间的变化过程见图 1。从图 1 可以看出,砾石覆盖对土壤湿润峰运移特征产生明显影响,所有处理湿润峰的一维垂向运动均随入渗时间而逐渐增加,但行进至土柱底部所用时间不同,且各处理湿润峰运移距离随时间变化特征有所差异。与 CK 相比,砾石覆盖厚度 6 cm 明显增加了湿润锋运移速度,且随着砾石覆盖厚度的增加,湿润锋运移速度明显加快。以入渗时间 40 min 为例,砾石覆盖厚度 6,9,12,15 cm 的湿润锋运移距离分别为 25.6,27.8,32.3,35 cm,远高于 CK 的运移距离 19.3 cm。可知土壤表层砾石覆盖厚度越大,湿润锋运移越快,即砾石覆盖厚度与湿润锋运移距离呈正相关。

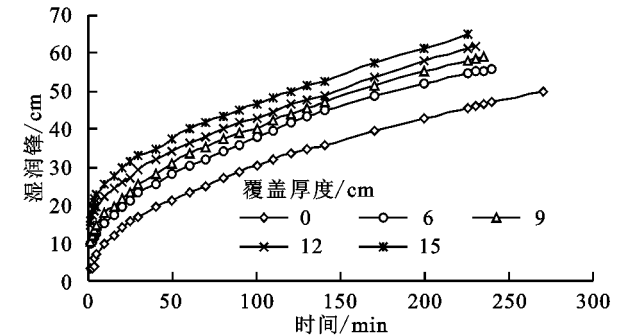


图 1 不同砾石覆盖厚度时湿润锋运移随时间的变化关系

为了更好的对湿润锋运移随覆盖厚度变化进行研究,采用幂函数 $F=at^b$ 对湿润锋与入渗时间关系进行拟合。式中: F 为湿润锋运移距离(cm); t 为入渗时间(min); a 、 b 为模型参数。其中 a 表征第一个计时单位后的湿润锋运移距离; b 表征湿润锋的衰减程度。由表 1 可知,幂函数可以很好的拟合不同覆盖厚度下土壤的湿润锋运移规律,各处理的决定系数(R^2)均大于 0.966。在湿润锋运移随入渗时间变化过程中,随覆盖厚度的增加, a 呈增大趋势, b 为减小趋势,即初始湿润锋运移距离增大,衰减速度渐缓。

表 1 不同砾石厚度条件下湿润锋随时间变化的拟合结果

砾石覆盖厚度/cm	a	b	R^2
0(CK)	2.97	0.505	0.999
6	5.76	0.413	0.992
9	6.87	0.390	0.991
12	10.78	0.307	0.966
15	12.92	0.284	0.979

2.2 砾石覆盖对土壤水分入渗性能的影响

土壤入渗过程通常可分为渗透初期分子力作用下入渗率较高的瞬变阶段、毛管力和重力作用下入渗率迅速下降的渗漏阶段和重力作用下的稳定入渗 3 个阶段^[14]。由图 2 可知,砾石覆盖厚度对土壤入渗

曲线影响较明显,随砾石覆盖厚度的增加,土壤入渗率随入渗时间的延长迅速降低,入渗曲线坡度增大,瞬变、渗漏和稳定入渗 3 个阶段差别更加显著,但均在 35 min 左右趋于稳定,达到稳定入渗阶段。

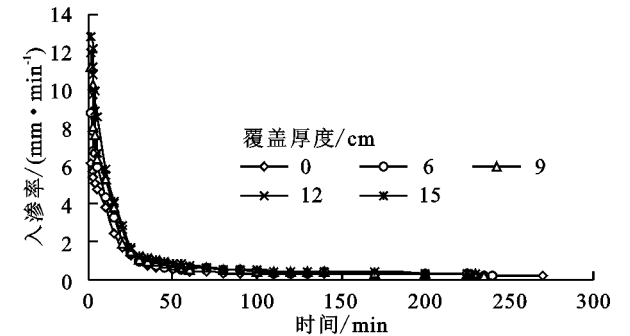


图 2 不同砾石覆盖厚度时入渗速率随时间变化关系

由表 2 可知,砾石覆盖对土壤的初始入渗率产生显著影响。覆盖厚度为 6,9,12,15 cm 的初始入渗率相对于 CK 分别显著增加 40%,81%,91%和 110% ($P<0.05$)。同时也发现,砾石覆盖对土壤稳定入渗率有一定的影响。与 CK 相比,覆盖厚度为 6,9,12,15 cm 的稳定入渗率显著增加($P<0.05$),但增加幅度较小,分别仅为 15.3%,17.9%,20.5%和 25.6%。由表 2 和图 3 可知,覆盖厚度为 6,9,12,15 cm 的平均入渗率相对于 CK 分别增加了 25.8%,38.7%,50%和 62.9%,累积入渗量分别增加了 4.3%,11.8%,12.8%和 17.1%,即累积入渗量与砾石覆盖厚度呈正相关关系。

表 2 不同砾石覆盖厚度时的土壤水分入渗特性				
砾石覆盖厚度/cm	初始入渗率/(mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/(mm·min ⁻¹)	平均入渗率/(mm·min ⁻¹)	入渗总量/mm
0(CK)	5.96±0.247d	0.39±0.119c	0.62±0.861b	169.27
6	8.36±0.905c	0.45±0.147b	0.78±1.074b	176.49
9	10.78±0.636b	0.46±0.155b	0.86±1.127ab	189.16
12	11.43±0.806ab	0.47±0.201ab	0.93±1.265ab	190.93
15	12.52±0.488a	0.49±0.223a	1.01±1.442a	198.15

注:不同小写字母表示处理在 5%水平差异显著。

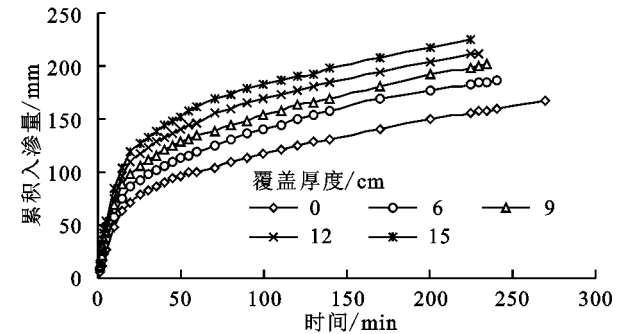


图 3 不同砾石覆盖厚度时累积入渗量随时间变化关系

2.3 土壤入渗过程模型分析

为进一步研究砾石覆盖厚度对土壤水分入渗过程的影响,选用 Kostikov、Horton 和 Philip 模型对砂田砾石覆盖土壤入渗过程进行模拟(表 3)。根据

Kostiakov 模型对土壤入渗过程拟合结果显示,参数 a 、 b 值均随覆盖厚度的增加而增大。 a 值越大,说明土壤入渗曲线的斜率越大,瞬时入渗率衰减越快, b 值越大,说明随着覆盖厚度增加,入渗速率的衰减速度增加。这与图 2 中入渗曲线的变化趋势一致。Kostiakov 模型的 R^2 均高于 0.911,拟合效果较好。从 Horton 模型的拟合结果来看, f_1 、 f_c 分别表征初始入渗率和稳定入渗率,均随覆盖厚度的增加而增加,这与表 2 结果相一致,同时 f_1 与实际观测值仅相差 0.63~1.3 mm/min, f_c 的与实际观测值仅相差 0.002~0.057 mm/min,很好的反映了砾石覆盖对土

壤入渗过程的影响。Horton 模型的 R^2 均高 0.984,其拟合效果最好。在 Philip 模型中,依次将 f_c 代入模型求得 s , s 在一定程度上反映了土壤初始入渗率的大小。由表 3 可得, s 随覆盖厚度的增加而增加,说明土壤的初期入渗能力随覆盖厚度的增加而增加,这与表 2 结果一致;但 s 值与土壤初始入渗率相差较大,同时 Philip 模型的 R^2 最高值仅为 0.863,拟合效果较差。这说明 Philip 模型虽然有一定的物理基础,但在砾石覆盖不同厚度的土壤水分入渗过程中适用性较差。综上可知 Horton 模型对砂田砾石覆盖土壤水分入渗过程具有较高的适用性。

表 3 不同砾石覆盖厚度时的土壤水分入渗模型分析

砾石覆盖 厚度/cm	Kostiakov 模型		Horton 模型		Philip 模型	
	$f(t)=at^{-b}$	R^2	$f(t)=f_c+(f_1-f_c)e^{-kt}$	R^2	$f(t)=0.5st^{-0.5}+f_c$	R^2
0(CK)	$f(t)=7.78t^{-0.499}$	0.869	$f(t)=0.29+(6.59-0.29)e^{-0.005t}$	0.994	$f(t)=6.96t^{-0.5}+0.35$	0.831
6	$f(t)=10.64t^{-0.538}$	0.911	$f(t)=0.40+(9.10-0.40)e^{-0.006t}$	0.995	$f(t)=9.14t^{-0.5}+0.45$	0.856
9	$f(t)=11.32t^{-0.554}$	0.924	$f(t)=0.46+(11.56-0.46)e^{-0.008t}$	0.984	$f(t)=11.17t^{-0.5}+0.46$	0.863
12	$f(t)=14.50t^{-0.556}$	0.913	$f(t)=0.47+(12.61-0.47)e^{-0.007t}$	0.991	$f(t)=11.43t^{-0.5}+0.47$	0.861
15	$f(t)=16.04t^{-0.569}$	0.895	$f(t)=0.51+(14.22-0.51)e^{-0.007t}$	0.997	$f(t)=13.92t^{-0.5}+0.50$	0.849

3 讨论

土壤表面砾石存在会显著影响土壤水分入渗过程^[8,15-16],且随砾石覆盖厚度的增加,土壤湿润锋运移距离和累积入渗量显著增加,这与前人的研究结果相一致^[15,17]。王小燕等^[8]认为随着砾石覆盖厚度的提高,土壤贮水能力增加,土壤水向下移动的压力势增加,导致土壤水分入渗能力增加;宋日权等^[17]和党宏宇等^[15]认为随着砾石覆盖厚度增加,土壤中的孔隙数量明显增加,提高土壤导水率,从而导致湿润锋运移距离和入渗量增加;但 Zhang 等^[16]研究也发现,砾石与土壤的位置关系也是影响土壤湿润锋运移和入渗量的重要因素,当砾石覆盖于土壤表面时,入渗量随砾石覆盖厚度增加而增加;当砾石镶嵌于土壤表层时,入渗量随砾石镶嵌厚度增加而减小。由此可见,砾石覆盖厚度可以增加土壤孔隙,改善土壤结构,有利于水分下渗,但需要注意砾石与土壤的位置关系。

不同砾石覆盖厚度条件下土壤入渗曲线均随时间的延长渐趋平缓。砾石覆盖厚度对土壤趋于稳定入渗的时间影响较小,说明土壤质地是影响土壤入渗过程的主要因素,这与吉恒莹等^[18]的研究结果一致。而土壤初始入渗率随砾石覆盖厚度的增加而迅速增加,张翼夫等^[19]认为覆盖提高地表粗糙度,抑制了表层土壤流失,减少了土壤结皮的形成,增加了土壤孔隙数量,改善了土壤结构,促进了土壤水分快速入渗。水分快速下渗导致土壤快速湿润,团聚体破碎,对土壤孔隙结构的堵塞和挤压增强,孔隙连通性变差,渗透能力降

低,导致初始入渗率迅速下降^[20]。与初始入渗率相比,土壤稳定入渗率随砾石覆盖厚度的增加变化缓慢。这主要是随着砾石覆盖厚度增加,一方面提高了土壤贮水能力,增大压力势,利于水分下渗,但另一方面使土壤密实,容重增大,加剧了土壤团聚体的崩解挤压作用堵塞孔隙^[21],并减小了过水断面积,增加了水流通道的弯曲度,不利于水分入渗,导致土壤稳定入渗率的增速缓慢。因此导致众多学者对土壤入渗率与砾石覆盖厚度关系的研究结果不同。

土壤入渗过程的模型拟合结果显示,Kostiakov 模型对不同砾石覆盖厚度土壤水分入渗的影响拟合较好;Philip 模型虽然有一定的物理基础,但适用性较差,这与许多学者对土壤入渗过程模拟的研究结果一致^[22-23];Horton 模型拟合的 R^2 最高,且具有物理意义,最适宜描述不同砾石覆盖厚度土壤水分入渗过程,这与赵文举等^[24]对西北旱区压砂地、刘目兴等^[25]对三峡库区林草地和魏恒等^[26]对塔里木河上游典型地表的入渗模型适应性研究结果相一致。通过土柱模拟固然可以反映土壤入渗过程和特征,但与研究区实际情况存在一定差异,建议以后采用原状土进行进一步研究。

4 结论

(1)砾石覆盖厚度是影响土壤水分入渗能力的重要因素。与 CK 相比,砾石覆盖厚度为 6 cm 时,湿润锋运移距离和累积入渗量均明显增大。湿润锋运移距离、累积入渗量分别与砾石覆盖厚度呈正相关关

系。但随着入渗时间延长,砾石覆盖厚度对湿润锋运移和累积入渗量影响程度减弱。

(2)砾石覆盖厚度在一定程度上改变了土壤水分入渗曲线。与CK相比,砾石覆盖厚度对土壤趋于稳定入渗的时间影响较小,但对土壤初始入渗率及入渗初期的衰减速率有十分显著的影响。

(3)就砂田而言,土壤入渗模型拟合以 Horton 模型最好,且具有物理意义,Kostiakov 模型次之,Philip 模型拟合效果较差。

参考文献:

- [1] 王占军,蒋齐,何建龙,等.宁夏环香山地区压砂地土壤肥力特征分析[J].水土保持学报,2010,24(2):201-204.
- [2] Yang Q, Wang Y J, Xie Z K. Long-term gravel-sand mulch affects soil physicochemical properties, microbial biomass and enzyme activities in the semi-arid Loess Plateau of North-western China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 2014, 64(4): 294-303.
- [3] 白一茹,王幼奇,王菲,等.压砂地土壤导水特性空间格局及影响因子[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):55-61.
- [4] Lü H S, Yu Z B, Horton R, et al. Effect of gravel-sand mulch on soil water and temperature in the semiarid loess region of Northwest China[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18(11): 1484-1494.
- [5] 赵文举,马宏,徐裕,等.模拟降雨条件下压砂地土壤水分入渗规律研究[J].水土保持学报,2015,29(4):79-84.
- [6] 周蓓蓓,邵明安.不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J].土壤学报,2007,44(5):801-807.
- [7] 朱元骏,邵明安.含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J].水科学进展,2010,21(6):779-787.
- [8] 王小燕,李朝霞,蔡崇法.砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J].水科学进展,2012,23(1):38-45.
- [9] 梁洪儒,余新晓,樊登星,等.砾石覆盖对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):57-61.
- [10] 党宏宇.桂西北喀斯特山区碎石对土壤水分入渗过程影响的试验研究[D].北京:中国科学院研究生院,2012.
- [11] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. Geomorphology, 2012, 151/152(1): 234-242.
- [12] Zavala L M, Jordán A, Bellinfante N, et al. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(1): 95-104.
- [13] 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.
- [14] 夏江宝,谢文军,陆兆华,等.再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响[J].生态学报,2010,30(15):4137-4143.
- [15] 党宏宇,邵明安,陈洪松,等.不同煤矸石厚度及位置对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):62-66.
- [16] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress[J]. Catena, 2016, 147(12): 153-166.
- [17] 宋日权,褚贵新,冶军,等.掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J].农业工程学报,2010,26(增刊1): 109-114.
- [18] 吉恒莹,邵明安,贾小旭.水质对层状土壤入渗过程的影响[J].农业机械学报,2016,47(7):183-188.
- [19] 张翼夫,王庆杰,胡红,等.华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J].农业机械学报,2016,47(5):138-145.
- [20] 范云涛,雷廷武,蔡强国.湿润速度和累积降雨对土壤表面结皮发育的影响[J].土壤学报,2009,46(5):764-771.
- [21] 唐胜强,余冬立.灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J].农业机械学报,2016,47(10):108-114.
- [22] 刘芝芹,黄新会,王克勤.金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2014,28(2):57-62.
- [23] 郑和祥,李和平,郭克贞,等.河套灌区冬小麦冻结期土壤入渗特性分析[J].农业工程学报,2014,30(4):70-78.
- [24] 赵文举,李晓萍,范严伟,等.西北旱区压砂地土壤水分入渗规律研究[J].土壤通报,2016,47(1):150-155.
- [25] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [26] 魏恒,赵成义,孙栋元.塔里木河上游绿洲典型地表特征土壤水分入渗性能研究[J].冰川冻土,2010,32(4): 837-843.