

辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响

吕刚, 王婷, 王韞策, 翟景轩, 李叶鑫

(辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 基于室内土柱模拟试验对比分析辽西低山丘陵区坡地不同粒径及砾石含量的土壤入渗规律, 并采用4种模型分析了含砾石土壤对传统土壤入渗模型的适用性。结果表明: 粒径一定时, 随砾石含量的增加土壤累积入渗量减少, 随累积入渗量的增加土柱湿润锋变化速率由小变大; 砾石含量小于20%时, 湿润锋前进到一定深度下, 土壤累积入渗量随粒径的增加而增大; 当砾石含量增大到一定值时, 砾石含量相同直径不同的土壤累积入渗量与湿润锋随时间的变化基本无差异。累积入渗量与湿润锋推进距离呈良好的线性关系。利用Green-Ampt模型、通用模型、Horton模型和Kostiakov模型对入渗率与入渗历时的关系进行拟合, 其中砾石含量为5%时, Horton模型拟合效果最好, 砾石含量为10%~30%时通用模型适用性更强, Horton模型拟合效果最差, 其他模型拟合效果因砾石含量及粒径等因素的不同而异。

关键词: 土壤入渗; 砾石; 入渗模型; 累积入渗量; 辽西低山丘陵区

中图分类号: S152.7⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0086-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.015

Effect of Gravel Content and Particle Size on Soil Infiltration in Low Mountainous Upland Region of Western Liaoning Province

LÜ Gang, WANG Ting, WANG Yunce, ZHAI Jingxuan, LI Yexin

(Liaoning Technical University College of Environmental Science and Engineering, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: The study based on laboratory soil-column experiments to research the effects of different gravel content and particle size on soil infiltration process and the applicability of the traditional soil infiltration model by four models. The results showed that the cumulative infiltration of soil decreased with the increase of gravel content, and the change of the wetting front in soil column was reduced and gradually tend to be level-off with the increase of cumulative infiltration. When the gravel content was less than 20%, the cumulative infiltration rate increased with the increase of the particle size, and there was no difference between the cumulative infiltration and wetting front with time when the gravel content increases to a certain value (20%~30%). There was a good linear relationship between the amount of cumulative infiltration and wetting front distance. Green-Ampt model, General model, Horton model and Kostiakov model were used to fit the relationship between infiltration rate and infiltration duration. Horton model showed best fitting effect when the gravel content was 5%, but worst in 10%~30%, while general model was more applicable, the fitting effect of other models varied with gravel content and particle size.

Keywords: soil infiltration; gravel; infiltration model; cumulative infiltration; low mountainous upland region of western Liaoning Province

作为自然界水循环中的一个重要环节, 土壤水分入渗是地表水转化为可被植物吸收利用的土壤水的唯一途径, 传统的水分入渗及土壤结构的研究多致力于发育较好的森林地带, 研究对象多是颗粒直径小于2 mm的均质土壤^[1-2], 但由于母质岩性、土壤发生过程以及人类活动的影响, 导致土壤中出现夹杂砾石的

现象^[3]。Marshall等^[4]研究表明, 母质的理化性质、气候因素、地貌因素及侵蚀速率等影响碎石的含量和粒径等分布特征, 存在于土壤中的砾石(>2 mm粒径), 直接影响土壤孔隙度, 土壤大孔隙、传导孔隙的改变影响了容重、含水量及有机质等理化性质^[5-8]; 地表砾石的覆盖影响土壤生物结皮等特性, 从而改变了

地表产流和壤中流等土壤水分运动特征^[9],因此含砾石土壤入渗性能因为砾石的存在而有别于均质土壤。国内的相关研究表明^[10-12],我国的黄土高原地区、喀斯特地区及紫色土区受成土过程影响土壤中均有砾石存在,其中黄土高原地区砾石因含量和粒径等自身性质的不同与土壤入渗性能的关系可能是正相关也可能是负相关^[12],对土壤入渗的影响存在一个转折点^[13],西南喀斯特地区不同砾石粒径及隔层位置对水分运移有一定影响^[14],紫色土砾石的存在对土壤稳定入渗率、饱和含水量、沥水后含水量、开始下漏时间、下漏稳定时间等有一定的影响^[15-16]。

2005 年第四次辽宁省土壤侵蚀遥感普查数据显示^[17],锦州、葫芦岛、阜新、朝阳等辽西 4 市土壤侵蚀总面积为 209.06 万 hm^2 , 占全省总侵蚀面积的 49.4%, 占该区总面积的 41.6%, 作为辽西西部的生态屏障、粮食、畜产品和果品生产基地^[18], 该区的水土流失治理与植被恢复工作显得尤为重要且形势严峻。全国水土保持区划(2012 年)已将辽西地区划入北方土石山区, 土壤中含有大量砾石, 由于地处丘陵地带, 区内总体植被覆盖较差, 雨量偏少, 水资源短缺, 坡地产流与侵蚀产沙明显^[19]。含砾石土壤是一种介于均质土壤和碎裂岩石之间的土石混合介质, 由于受到土壤中砾石分布、砾石特征及降雨强度等各种因素的影响^[20], 其土壤水分运动存在一定的特殊性。因此, 本文以辽西低山丘陵区某一典型坡面为研究对象, 通过研究坡面砾石分布及其对土壤水分入渗的影响, 筛选适用该区的土壤入渗模型, 这将有利于更加深入的了解坡地含砾石土壤的水文—侵蚀过程, 为更加有效利用坡地水土资源和防治水土流失, 提升植被水分承载力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁省阜新市阜新蒙古族自治县衙门小流域, 流域面积 26.91 km^2 , 其中水土流失面积 11.27 km^2 , 平均土壤侵蚀模数 3 562.75 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 属北温带大陆季风气候, 多年平均降水量 520 mm, 年均汛期降水量 350 mm, 降水时间分布不均, 旱灾频发, 年蒸发量为 1 870 mm, 年均风速 2.3 m/s , 年均大风日数为 31 d。年均气温 7.2 $^{\circ}\text{C}$, 年均最低温 -25 $^{\circ}\text{C}$, 年均最高温 32 $^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温约 3 289 $^{\circ}\text{C}$, 无霜期 135 d, 年均最大冻土深 1.43 m。土壤类型为棕壤, 土壤肥力低, 土层较薄。在该小流域内选取一坡面, 设置不同坡位取样点见图 1。

1.2 供试样品采集

于 2015 年 10—11 月进行土壤样品的采集, 试验所用土壤样品采自辽宁省阜新市衙门小流域内的荒

坡地(121°35′25″E, 42°9′1″N), 土壤类型为棕壤, 坡面上无林草覆盖, 表层土壤中偶见枯草。在坡面距坡顶 200 m 处开始选点, 选取上、中、下不同坡位上各取 3 点(图 1), 3 点呈等腰三角形分布, 各点之间距离约为 15 m, 每个点位处设置 3 个重复 1 m×1 m 样地, 平整表面后, 每个样点分 4 层取样, 以 10 cm 和 20 cm 为单元, 控制取样深度为 0—10, 10—20, 20—40, 40—60 cm 共计 4 层, 每个土层用塑料袋取 1 kg 左右土样, 带回室内自然风干后过 2, 5, 10, 20 mm 土壤筛, 筛分出细土和各粒径砾石, 分别测定土样总重及冲洗烘干后的砾石质量, 求出砾石占土壤的质量百分比。不同坡位各土层砾石质量含量统计结果见表 1。

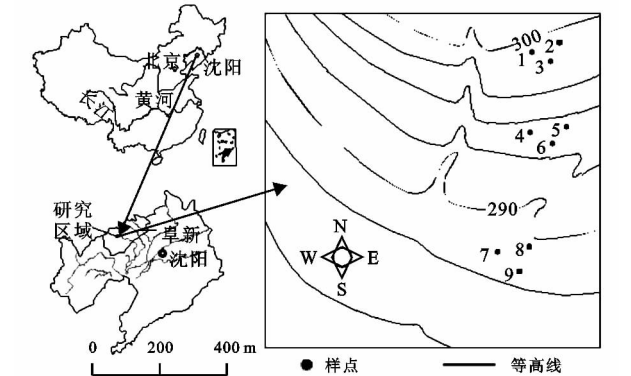


图 1 研究区样点分布

表 1 坡面砾石含量 单位: %

土层深度/cm	坡上	坡中	坡下
0—10	7.62	16.97	23.39
10—20	10.20	25.64	23.81
20—40	16.04	32.96	30.04
40—60	28.26	38.83	28.21

1.3 试验装置与方法

土壤入渗模拟试验采用一维垂直定水头入渗法, 将土石混合介质装填于特制的有机玻璃柱(土柱), 玻璃柱内径 10 cm, 高 100 cm, 底部均匀分布 0.5 cm 细孔的有机玻璃板(厚 10 mm), 马氏瓶由统一型号的玻璃出流瓶改装, 容量 5 L, 供水水头固定在 5 cm 左右, 试验装置见图 2。

根据筛分后砾石粒径大小及质量含量特点, 确定试验选取 2~5, 5~10, 10~20, >20 mm(>20 mm 的砾石粒径上限为 30 mm) 4 种粒径砾石及 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% 7 种砾石质量含量, 共设置 28 组试验, 每组试验设置 3 个重复。土柱装填时, 土柱底部的有机玻璃板上放滤纸防治土壤颗粒流失, 装填容重按实验测得土壤容重 1.5 g/cm^3 , 砾石容重 2.57 g/cm^3 进行, 按 5 cm 高度一层装填, 将土壤和砾石混合均匀装填, 每个土柱共 12 层。装填过程中每层装填时边界敷以细土减少边界效应, 此外, 粒径>20 mm 的砾石含量较多时, 分次填装每 5

cm 层的土石混合介质,确保每次装填混合均匀,以保证大粒径砾石与细土混合均匀。试验过程中,由马氏瓶提供恒定水头供水,每 5 min 观测记录马氏瓶及土柱湿润锋读数,直至湿润锋到达土柱底部为止。

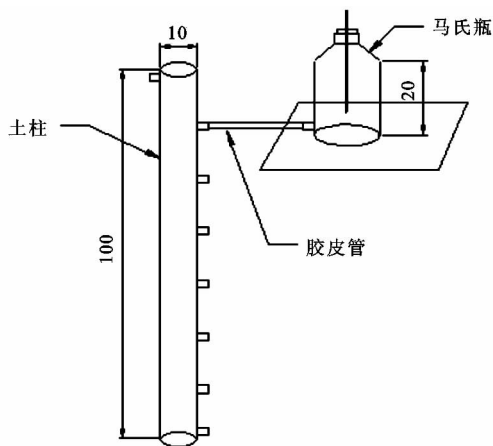


图 2 试验装置

1.4 入渗基本公式

采用 Green-Ampt 模型、通用经验模型、Kostiakov 模型、Horton 模型拟合含砾石土壤入渗过程。Green-Ampt 模型为理论型公式: $f(t) = at^{-0.5} + b$ 。式中: $f(t)$ 为入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (mm/min); b 为稳定入渗率 (mm/min); a 为拟合参数; 其他 3 种入渗公式为经验型公式, 通用经验模型公式为: $f(t) = a + b t^{-n}$ 。式中: $f(t)$ 为入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (mm/min); a, b 为经验参数; n 为拟合参数; Kostiakov 模型公式: $f(t) = at^{-n}$ 。式中: $f(t)$ 为入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (mm/min); a, n 为拟合参数; Horton 模型公式为: $f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$ 。式中: $f(t)$ 为入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (mm/min); f_0 为初始入渗率 (mm/min); f_c 为稳定入渗率 (mm/min); k 为经验参数。

2 结果与分析

2.1 不同砾石含量及粒径与土壤累积入渗量及湿润锋关系

2.1.1 不同砾石含量对土壤累积入渗量与湿润锋关系的影响 累积入渗量是指一定时间内随入渗的进行马氏瓶中下渗的水量, 湿润锋是指被湿润的土壤部位与干土层间形成的明显的交界面, 即湿润区的最前缘, 反映入渗水量垂向运动的特征^[21-22]。根据试验所得数据绘制同一粒径下不同砾石含量对土壤累积入渗量与湿润锋关系的影响变化关系见图 3, 本试验中累积入渗量用马氏瓶中入渗水深表示^[23-24]。

从图 3 可以看出, 随时间的变化, 砾石含量和直径均不同的情况下, 随累积入渗量的增加, 土柱湿润锋均呈增大趋势且增大速率由大变小; 此外, 湿润锋在入渗开始时各组试验差异不显著, 随着试验的进

行, 不同砾石含量湿润锋的大小差异逐渐明显, 这主要是因为入渗初期干燥的土壤水势梯度较大, 相比巨大的水吸力的作用, 土壤中砾石对土壤入渗的影响因素较小, 试验过程中, 随着累积入渗量的增加, 土壤含水量增加、水势梯度减小, 较大的水分含量梯度促使湿润锋的前进, 砾石对土壤入渗的作用逐渐体现出来^[23,25]。当湿润锋增加到 30 cm 左右时, 各土柱入渗湿润锋差异逐渐显现出来, 累积入渗量较大的土壤湿润锋与累积入渗量的关系曲线较平缓, 反之则相反。不同粒径情况下, 湿润锋到达底部时累积入渗量较大的都是纯土或砾石含量较少的土壤 (0%, 5%, 10%), 其中, 砾石含量为 5% 时累积入渗量最大, 各粒径下平均为 8.33 cm, 其次为纯土, 累积入渗量为 7.4 cm, 而砾石含量为 15%~30% 时土壤累积入渗量较小, 介于 5.28~5.95 cm 之间, 砾石含量较小或不含砾石的土壤颗粒及其与砾石的结构较紧密, 上层土壤水分饱和后才能保证湿润锋的继续下移, 因此土壤累积入渗量大, 较大的砾石含量使得土壤中大孔隙数量增多, 容易产生联通的大孔隙, 而一定数量的大孔隙有助于土壤中优势流的产生, 从而促进了土壤入渗, 湿润锋下降到同一高度时土壤累积入渗量小。而粒径在 >20 mm 砾石含量 15% 的土壤累积入渗量较大, 这可能是因为较大的粒径导致过水断面逐渐减少, 水分运动通道弯曲复杂, 反而减少了入渗速率, 增加了累积入渗量。

2.1.2 不同砾石直径对土壤累积入渗量与湿润锋关系的影响 根据试验所得数据绘制下相同砾石含量不同粒径对土壤累积入渗量与湿润锋关系的影响变化关系见图 4。从图 4 可以看出, 砾石含量为 5% 时, 同一湿润锋面上直径为 2~5 mm 的土壤湿润锋与累积入渗量关系曲线斜率最缓, 土壤累积入渗量为 12.5 cm, 分别为粒径 5~10, 10~20, >20 mm 的 1.79, 1.67, 1.98 倍, 砾石含量和粒径较小时, 湿润锋和累积入渗量因受砾石存在而产生的过水断面的阻碍作用, 湿润锋转移较慢且累积入渗量较大; 砾石含量为 10% 时, 直径为 10~20 mm 的土壤累积入渗量最大, 5~10, 10~20, >20 mm 的土壤累积入渗量差异不明显; 砾石含量为 15% 时, 粒径 >20 mm 的土壤累积入渗量为 6.8 cm, 相比其他粒径最大, 这是因为随着砾石含量增加及粒径的增大, 土壤中不连续的大孔隙产生的可能性增加, 只有当土壤含水量增长到一定的值土体全部湿润时, 湿润锋才会继续下渗; 而当砾石含量继续增大到 20%~30% 时, 不同直径土壤累积入渗量与湿润锋的关系差异不明显, 说明当砾石含量增大到一定值时, 砾石含量相同直径不同的土壤累积入渗量与湿润锋随时间的变化差异较小, 曲线基本重叠。

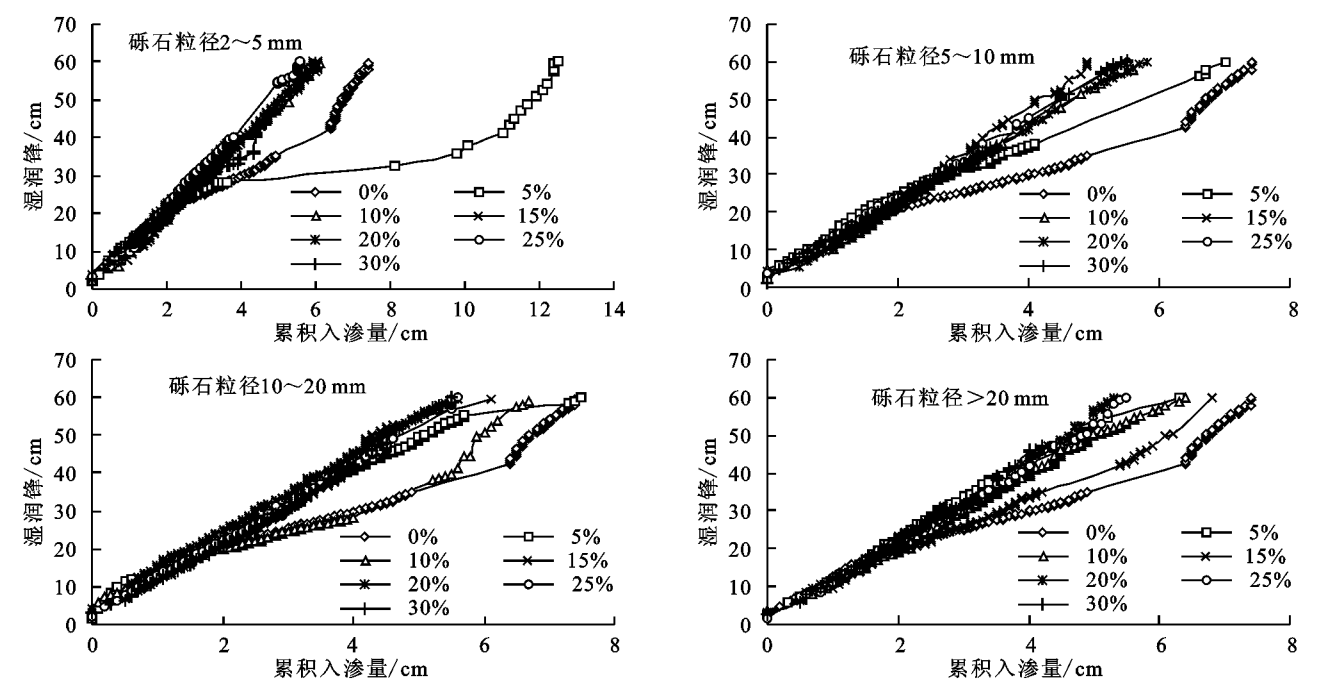


图3 不同砾石含量对土壤累积入渗量与湿润锋关系的影响

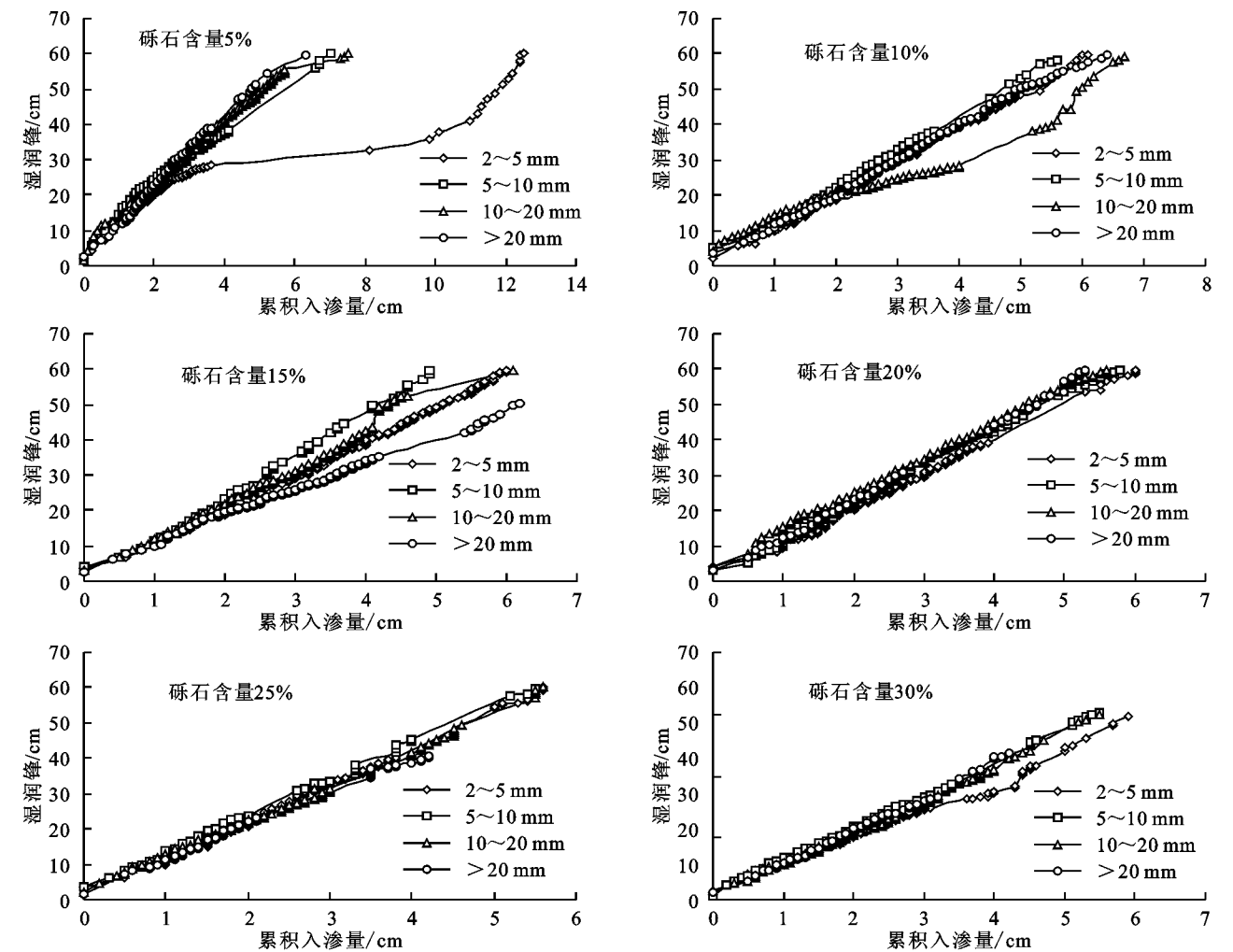


图4 不同砾石直径对土壤累积入渗量与湿润锋关系的影响

2.2 湿润锋推进距离与累积入渗量的关系

研究结果显示,入渗时间一定时,湿润锋与累积入渗量之间有一定的关系,对不同砾石含量及粒径下

湿润锋与累积入渗量之间的关系可采用关系式为:
$$I=nZ_f+d$$
式中: I 为累积入渗量(cm); Z_f 为湿润锋推进距离

(cm); n 和 d 分别为拟合参数,具体拟合参数见表 2。

由表 2 可以看出,累积入渗量 I 与湿润锋的推进距离 Z_f 之间呈良好的线性关系,相关系数 R^2 基本在 0.9 以上。由公式可看出 n 值为直线斜率, n 值越大,说明湿润锋推进一定距离所需要的水量越大,即累积入渗量越大。含砾石土壤的 n 值基本都小于均质土壤。相同粒径条件下,随砾石含量的增加 n 值总体呈减小趋势, d 值呈增大趋势。粒径为 2~5mm 时, n 值在砾石含量 0~25% 时呈减小趋势,砾石含量为 30% 时略有增加;粒径为 5~10 mm 时,在砾石含量 0~15% 时 n 值呈减少趋势,20%~30% 时略有增加, d 值总体呈增加趋势;粒径为 10~20 mm 时, n 值和 d 值随机变化;粒径为 >20 mm 时, n 值先升高,到砾石含量 15% 达最大, d 值变化无规律。一定砾石含量条件下, n 值在 5% 时随粒径增大而减小,随着砾石含量增大,随砾石粒径的变化 n 值和 d 值没有一定的规律。

表 2 累积入渗量与湿润锋推进距离关系的拟合参数

砾石直径/mm	砾石含量/%	n	d	R^2
—	0	0.1483	-0.6744	0.973
2~5		0.2648	-3.3869	0.865
5~10	5	0.1275	-0.9765	0.978
10~20		0.1142	-0.5854	0.985
>20		0.0977	-0.2069	0.993
2~5		0.1031	-0.0386	0.997
5~10	10	0.0955	-0.0856	0.996
10~20		0.1462	-0.6778	0.931
>20		0.1042	-0.1283	0.996
2~5		0.1020	-0.0110	0.998
5~10	15	0.0810	0.1562	0.994
10~20		0.0908	0.0794	0.977
>20		0.1359	-0.5384	0.993
2~5		0.1005	-0.0594	0.996
5~10	20	0.0958	-0.1300	0.996
10~20		0.1001	-0.4780	0.999
>20		0.0913	0.0546	0.997
2~5		0.0954	-0.0758	0.997
5~10	25	0.0958	-0.2887	0.996
10~20		0.1001	-0.1768	0.995
>20		0.0972	-0.0878	0.996
2~5		0.1135	0.3205	0.983
5~10	30	0.0944	-0.1537	0.996
10~20		0.0966	-0.0275	0.993
>20		0.0937	-0.0444	0.990

2.3 不同入渗模型对供试土壤入渗率的适用性

选用 Green-Ampt 模型、通用模型、Horton 模型、Kostiakov 模型 4 种经典的适用于均质土壤入渗模型,用 Origin 8.0 软件进行拟合,探讨其对含砾石土壤的适用性。从表 3 可以看出,当砾石含量为 0% 时,土壤入渗的拟合效果为通用模型>Kostiakov 模型>Green-Ampt 模型>Horton 模型;砾石含量较小时,不同砾石粒径下 Horton 模型回归决定系数 R^2 为 0.918~0.974,相比其他入渗模型模拟效果最好,

随砾石含量的增大,砾石含量为 10%~30% 时,通用模型模拟效果最好,不同砾石粒径下通用模型回归决定系数 R^2 介于 0.967~0.999 之间;Kostiakov 模型和 Green-Ampt 模型的拟合效果因砾石含量及粒径的不同有一定的随机性,结合 20 个不同砾石含量及粒径土壤水分入渗的模型具体分析,发现其中 Kostiakov 模型占 16 个,Green-Ampt 模型占 4 个,表明 Kostiakov 模型相比 Green-Ampt 模型可以更好的模拟不同砾石含量及粒径土壤入渗过程和入渗能力,这可能是因为 Green-Ampt 模型中 t 的指数为常数,对入渗曲线前期砾石对含水量影响的入渗曲线的变化的拟合度较小,周蓓蓓等^[23]在不同碎石含量及直径的土石混合介质入渗模型的研究中也提出含砾石土壤入渗规律符合 Kostiakov 模型;总体来说,Horton 模型拟合效果最差,回归决定系数 R^2 介于 0.920~0.999 之间,这可能是因为砾石含量和粒径的不同决定入渗时间和入渗量,从而影响各模型的拟合效果,砾石含量>10% 时,总体来说入渗一定时间内累积入渗量减少,总体呈减函数趋势,从入渗模型公式上看,相较其他 3 种入渗模型,Horton 模型下渗能力随时间呈递增的指数变化。

3 讨论

土壤中砾石的存在对入渗的影响是多方面的,一方面砾石的存在有利于减少土壤细颗粒之间的接触面积,形成土壤大孔隙,相互联通的大孔隙促进土壤入渗;另一方面,由于砾石含量、粒径及砾石在土体中排列方式、砾石与砾石间接触状况的作用,可能使得水分入渗路径弯曲复杂,从而延缓土壤入渗。

辽西低山丘陵区含砾石土壤水分入渗室内模拟试验结果表明,砾石的含量及粒径对土壤入渗量及湿润锋的运移有一定的影响。在粒径一定的条件下,砾石含量为 0%,5%,10% 时一定湿润锋条件下累积入渗量较大,而砾石含量为 15%~30% 时土壤累积入渗量较小,可见,砾石含量较小或不含砾石的土壤累积入渗量较大,湿润锋运移速度慢;然而,在 >20 mm 径级,累积入渗量表现为砾石含量 15% 的土壤大于砾石含量为 10% 和 5% 的土壤,这表明随着粒径的增大累积入渗量不是一味的随着砾石含量的增大而减小,而是存在着一个转折点,这与杨艳芬等^[26]对新疆地区的土石混合介质的研究结果类似,可能是因为随着砾石含量增加及粒径的增大,细小孔隙的连续性阻断,土壤中不连续的大孔隙产生的可能性增加,只有当土壤含水量增长到一定的值土体全部湿润时,湿润锋才会继续下渗。李燕等^[27]对紫色土区的土石混合介质的研究结果表明,产生这种现象的原因与土壤的种类特性也有一定关系。

表 3 土壤入渗计算模型回归分析

砾石 含量/%	砾石 直径/mm	Green-Ampt 模型		通用模型		Horton 模型		Kostiakov 模型	
		模型	R^2	模型	R^2	模型	R^2	模型	R^2
0	—	$i=9.88t^{-1/2}+0.26$	0.954	$i=-0.23+7.08\times t^{(-0.32)}$	0.987	$i=0.6+2.41\times e^{-0.01t}$	0.849	$i=7.72\times t^{(-0.38)}$	0.983
5	2~5	$i=12.23t^{-1/2}+0.09$	0.938	$i=-0.38+9.38\times t^{(-0.36)}$	0.965	$i=0.53+3.11\times e^{-0.01t}$	0.918	$i=10.61\times t^{(-0.45)}$	0.952
	5~10	$i=10.26t^{-1/2}+0.11$	0.950	$i=-0.27+8.24\times t^{(-0.37)}$	0.964	$i=0.54+2.95\times e^{-0.01t}$	0.974	$i=9.14\times t^{(-0.45)}$	0.959
	10~20	$i=5.91t^{-1/2}+0.76$	0.533	$i=-0.79+10.37\times t^{(-0.61)}$	0.848	$i=0.56+1.59\times e^{-0.02t}$	0.938	$i=4.38\times t^{(-0.24)}$	0.721
	>20	$i=16.82t^{-1/2}-0.15$	0.965	$i=-0.56+15.05\times t^{(-0.4)}$	0.974	$i=0.56+5.00\times e^{-0.02t}$	0.967	$i=16.9\times t^{(-0.52)}$	0.957
10	2~5	$i=17.08t^{-1/2}-0.22$	0.993	$i=-0.07+19.03\times t^{(-0.55)}$	0.995	$i=0.55+5.46\times e^{-0.02t}$	0.877	$i=19.83\times t^{(-0.57)}$	0.995
	5~10	$i=24.29t^{-1/2}-0.57$	0.973	$i=0.04+35.23\times t^{(-0.67)}$	0.997	$i=0.68+10.43\times e^{-0.04t}$	0.916	$i=34.37\times t^{(-0.66)}$	0.997
	10~20	$i=6.53t^{-1/2}+0.34$	0.819	$i=-1.70+5.11\times t^{(-0.13)}$	0.967	$i=0.48+1.45\times e^{-0.01t}$	0.915	$i=4.73\times t^{(-0.32)}$	0.920
	>20	$i=21.43t^{-1/2}-0.14$	0.994	$i=0.11+24.62\times t^{(-0.57)}$	0.998	$i=0.91+7.83\times e^{-0.03t}$	0.888	$i=23.4\times t^{(-0.54)}$	0.997
15	2~5	$i=26.20t^{-1/2}-0.20$	0.998	$i=-0.01+28.24\times t^{(-0.54)}$	0.999	$i=1.09+8.92\times e^{-0.02t}$	0.899	$i=28.35\times t^{(-0.54)}$	0.999
	5~10	$i=21.31t^{-1/2}-0.48$	0.980	$i=-0.16+27.32\times t^{(-0.61)}$	0.994	$i=0.44+7.99\times e^{-0.02t}$	0.902	$i=29.88\times t^{(-0.66)}$	0.990
	10~20	$i=21.84t^{-1/2}-0.33$	0.989	$i=0.05+26.96\times t^{(-0.61)}$	0.997	$i=0.79+8.51\times e^{-0.03t}$	0.932	$i=26.3\times t^{(-0.59)}$	0.997
	>20	$i=19.95t^{-1/2}-0.24$	0.983	$i=-0.26+19.72\times t^{(-0.49)}$	0.983	$i=0.67+6.70\times e^{-0.02t}$	0.956	$i=21.85\times t^{(-0.56)}$	0.979
20	2~5	$i=22.63t^{-1/2}-0.43$	0.986	$i=-0.10+27.22\times t^{(-0.59)}$	0.993	$i=0.68+8.63\times e^{-0.03t}$	0.943	$i=28.42\times t^{(-0.61)}$	0.992
	5~10	$i=19.75t^{-1/2}-0.46$	0.964	$i=0.07+30.69\times t^{(-0.70)}$	0.998	$i=0.53+9.12\times e^{-0.04t}$	0.906	$i=29.25\times t^{(-0.68)}$	0.997
	10~20	$i=17.09t^{-1/2}-0.15$	0.915	$i=0.39+35.43\times t^{(-0.82)}$	0.989	$i=0.66+11.67e^{-0.07t}$	0.891	$i=23.14\times t^{(-0.60)}$	0.950
	>20	$i=20.25t^{-1/2}-0.43$	0.976	$i=-0.02+28.28\times t^{(-0.65)}$	0.997	$i=0.50+8.12\times e^{-0.03t}$	0.896	$i=28.63\times t^{(-0.66)}$	0.997
25	2~5	$i=21.29t^{-1/2}-0.38$	0.980	$i=0.001+27.11\times t^{(-0.61)}$	0.992	$i=0.66+8.42\times e^{-0.03t}$	0.926	$i=27.08\times t^{(-0.61)}$	0.992
	5~10	$i=15.76t^{-1/2}-0.33$	0.978	$i=-0.33+15.73\times t^{(-0.50)}$	0.978	$i=0.36+5.18\times e^{-0.02t}$	0.958	$i=18.85\times t^{(-0.61)}$	0.963
	10~20	$i=10.79t^{-1/2}-0.01$	0.970	$i=-0.07+10.12\times t^{(-0.47)}$	0.971	$i=0.44+3.55\times e^{-0.02t}$	0.925	$i=10.65\times t^{(-0.50)}$	0.970
	>20	$i=20.32t^{-1/2}-0.51$	0.964	$i=-0.05+30.34\times t^{(-0.68)}$	0.995	$i=0.42+8.85\times e^{-0.03t}$	0.919	$i=31.38\times t^{(-0.70)}$	0.995
30	2~5	$i=13.66t^{-1/2}-0.05$	0.986	$i=-0.24+11.98\times t^{(-0.44)}$	0.991	$i=0.46+3.32\times e^{-0.01t}$	0.857	$i=13.5\times t^{(-0.51)}$	0.985
	5~10	$i=10.1t^{-1/2}+0.13$	0.973	$i=-0.32+7.66\times t^{(-0.35)}$	0.996	$i=0.50+2.50\times e^{-0.01t}$	0.916	$i=8.67\times t^{(-0.43)}$	0.987
	10~20	$i=14.29t^{-1/2}-0.08$	0.991	$i=-0.09+14.2\times t^{(-0.50)}$	0.991	$i=0.55+4.87\times e^{-0.02t}$	0.872	$i=14.99\times t^{(-0.53)}$	0.990
	>20	$i=19.01t^{-1/2}-0.35$	0.964	$i=0.08+28.81\times t^{(-0.68)}$	0.995	$i=0.53+8.72\times e^{-0.04t}$	0.862	$i=27.15\times t^{(-0.65)}$	0.994

在相同砾石含量条件下,当砾石含量为 5%时,同一湿润锋面上直径为 2~5 mm 的土壤累积入渗量最大;当砾石含量为 10%时,直径为 10~20 mm 的土壤累积入渗量最大;当砾石含量为 15%时,粒径>20 mm 的土壤累积入渗量最大,这与刘建伟的研究结果一致^[28],而当砾石含量继续增大到 20%~30%时,不同直径土壤累积入渗量与湿润锋的关系差异不明显,可见砾石含量<20%时,随着砾石含量的增加,累积入渗量出现最大值的粒径呈增大趋势,砾石含量>20%时,不同粒径土壤过水断面逐渐接近最小极限^[23],粒径对土壤累积入渗量与湿润锋随时间变化的影响较小,表示累积入渗量和土柱湿润锋关系的曲线基本重合,而杨艳芬等^[26]提出碎石粒径对累积入渗量及湿润锋均无明显影响,这可能是不同地区及模拟试验条件下砾石粒径大小不同导致的。马东豪^[29]研究神木风沙地的料姜石粒径对入渗的影响也有相似的结论,可见砾石含量较小时,不同粒径砾石含量对土壤入渗的影响需要进一步分析,需要结合砾石大小、形状、种类、组合方式、吸水性、风化特征等多方面因素。

对累积入渗量与湿润锋推进距离采用公式 $I=nZ_f+d$ 拟合,与刘春成等^[30]、李毅等^[31] 研究结果一致,累积入渗量 I 与湿润锋的推进距离 Z_f 之间呈良好的线性关系, n 值大小代表湿润锋推进一定距离所

需要的水量,随着马氏瓶中的水不断下渗,累积入渗量逐渐增加,促使土柱中土壤水分饱和,推进湿润锋不断前进推移,粒径较小,砾石含量较小时, n 值较大,土壤累积入渗量大,与相同粒径时土柱模拟入渗结论一致。对传统入渗模型对含砾石土壤的适用性做了分析评价,得出砾石含量不同时各公式拟合效果有一定差异,Horton 模型对砾石含量为 5%拟合效果最好,当砾石含量>5%时拟合效果排序为通用模型>Kostiakov 模型>Green-Ampt 模型>Horton 模型,可见各模型对含砾石土壤的适用性受砾石含量的影响,Kostiakov 模型相比 Green-Ampt 模型拟合效果更好,可能是因为 Green-Ampt 模型中 t 的指数为常数,对入渗曲线前期砾石对含水量影响的入渗曲线的变化的拟合度较小,Horton 模型拟合效果最差,这与李雪垠等^[21]的研究结果有一定的差异,可能是砾石本身特性和试验设置的不同导致的。

4 结 论

(1)土壤中砾石的存在对土壤入渗总量有显著影响,在粒径一定的条件下,土壤累积入渗量随着砾石含量的增大而减小。

(2)在一定砾石含量条件下,不同粒径对土壤累积入渗量的影响差异很大,当砾石含量为 5%时,直径为

2~5 mm 的土壤湿润锋与累积入渗量关系曲线斜率最缓,分别为粒径 5~10,10~20,>20 mm 的 1.79,1.67,1.98 倍;砾石含量为 10% 时,直径为 10~20 mm 的土壤累积入渗量最大,5~10,10~20,>20 mm 的土壤累积入渗量差异不明显;砾石含量为 15% 时,粒径>20 mm 的土壤累积入渗量最大。当砾石含量增大到 20%~30% 时,不同直径土壤累积入渗量与湿润锋的关系差异不明显。

(3) 累积入渗量与湿润锋的推进距离之间呈良好的线性关系,相同粒径条件下,随砾石含量的增大湿润锋推进一定距离所需要的水量增大。

(4) 不同的砾石含量和粒径条件下,各公式拟合效果有一定差异,Horton 模型对砾石含量为 5% 拟合效果最好,当砾石含量>5% 时拟合效果排序为通用模型>Kostiakov 模型>Green-Ampt 模型>Horton 模型。Kostiakov 模型和 Green-Ampt 模型的拟合效果因砾石含量及粒径的不同有一定的随机性,Kostiakov 模型相比 Green-Ampt 模型可以更好的模拟不同砾石含量及粒径土壤入渗过程和入渗能力。

参考文献:

- [1] 王国梁,刘国彬,周生路.黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J].自然资源学报,2003,18(5):529-535.
- [2] 王健,吴发启,孟秦倩,等.不同利用类型土壤水分下渗特征试验研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(6):159-162.
- [3] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.三峡库区紫色土的碎石分布特征[J].土壤学报,2015,52(2):293-302.
- [4] Marshall J A, Sklar L S. Mining soil databases for landscape scale patterns in the abundance and size distribution of hill slope rock fragments[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2012,37(3):287-300.
- [5] 赵勇钢,赵世伟,曹丽花,等.半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J].农业工程学报,2008,24(6):14-20.
- [6] 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.
- [7] 潘永洁,吕世华,高艳红,等.砾石对青藏高原土壤水热特性影响的数值模拟[J].高原气象,2015,34(5):1224-1236.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ZHU Y J, SHAO M A. Spatial distribution of surface rock fragment on hill-slopes in a small catchment in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008,51(6):862-870.
- [11] Chen H S, Liu J W, Wang K L, et al. Spatial distri-

bution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China[J]. Catena,2011,84(1/2):21-28.

- [12] 王慧芳,邵明安.含碎石土壤水分入渗试验研究[J].水科学进展,2006,17(5):604-609.
- [13] 杨艳芬,王全九,曾辰,等.土石混合介质入渗模型及其参数影响因素研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):6-10.
- [14] 党宏宇,陈洪松,邵明安.喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J].农业工程学报,2012,28(8):38-43.
- [15] 龚久平,李燕,刘吉振,等.村镇水源地土壤中砾石对水分运动的影响[J].江西农业大学学报,2010,32(3):0621-0627.
- [16] 符素华.土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J].水土保持学报,2005,19(1):171-175.
- [17] 曹忠杰,蔡景平,何建明,等.辽宁省第四次土壤侵蚀遥感普查成果分析[J].水土保持应用技术,2007(5):21-22.
- [18] 贾天会.辽西水土流失区生态退化程度诊断分析[J].科学技术与工程,2008,8(13):3444-3449.
- [19] 兰景涛,范昊明,柴宇,等.辽西土石质低山区不同土地利用类型土壤侵蚀特征研究[J].中国水土保持,2009(8):8-10.
- [20] 吴冰,朱元骏,邵明安.降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响[J].水土保持学报,2011,25(6):87-91.
- [21] 李雪垠,李朝霞,王天巍,等.紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J].水科学进展,2016,27(5):662-669.
- [22] 陈洪松,邵明安,王克林.土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J].农业工程学报,2006,22(1):44-47.
- [23] 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.
- [24] 刘建国,王洪涛,聂永丰.多孔介质非饱和导水率预测的分形模型[J].水科学进展,2004,15(3):269-275.
- [25] 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.
- [26] 杨艳芬,王全九,曾辰,等.土石混合介质水分入渗特性试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):87-90,132.
- [27] 李燕,刘吉振,魏朝富,等.砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究[J].土壤学报,2011,48(2):435-439.
- [28] 刘建伟.桂西北喀斯特峰丛洼地石质土壤入渗试验研究[D].重庆:西南大学,2008.
- [29] 马东豪.黄土区土石混合介质水分运动试验研究及数值模拟[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2008.
- [30] 刘春成,李毅,任鑫,等.四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J].农业工程学报,2011,27(5):62-67.
- [31] 李毅,任鑫,Horton Robert.不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J].排灌机械工程学报,2012,30(4):485-490.