

不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响*

周蓓蓓^{1,2} 邵明安^{2,1†}

(1 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点试验室,陕西杨凌 712100)

摘要 由于成土原因或人类活动,一些土壤中含有不同含量及大小的碎石。碎石的存在改变了土壤的某些物理特性,入渗过程也因此受到影响。本研究采用定水头入渗试验装置,对 7 种不同碎石含量(0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%)及 4 种不同碎石直径(0.2~0.5 cm, 0.5~1.0 cm, 1.0~3.0 cm, 3.0~4.0 cm)的土壤水分入渗过程进行室内研究,旨在分析碎石含量及直径对土壤入渗过程的影响及其原因,为土石混合介质的研究提供一些理论基础。

关键词 累积入渗量;湿润峰;碎石含量;碎石直径

中图分类号 S 275 **文献标识码** A

土壤水分入渗一方面决定了产生地表径流的水量,从而对土壤侵蚀产生影响^[1~3];另一方面,它又影响土壤含水量,从而对作物可利用的有效水产生影响,影响作物产量^[3]。因此,国内外众多学者就入渗过程进行了大量的研究,并逐步发展成利用数学模型来预测土壤水分的运动过程。然而碎石的存在改变了土壤水分运动通道和过水断面,增加了土壤孔隙的弯曲程度,理论上讲,含有碎石土壤的水分运动较均质土壤更为复杂^[4]。自 19 世纪 50 年代,国外学者们就开始研究碎石对土壤水分过程的影响,但因取样的空间变异性及碎石含量、物理性质的差异性,使得研究成果不一致,甚至相互矛盾^[5]。Grant 和 Struchtemeyer^[6]通过室内模拟实验研究发现,移除土壤中碎石导致土壤部分孔隙减少,入渗速率降低;Abrahams 和 Parson^[7]针对没有用机械工具进行扰动的小区进行研究,得出入渗量与砾石含量之间的关系为正相关的结论;Valentin^[8]通过人工降雨试验研究指出在干旱、半干旱地区,土壤入渗量与碎石含量为负相关关系。同时,涉及碎石直径这一重要影响因子对土壤入渗过程的影响的相关研究较少。因此本文系统地针对不同碎石含量及直径对入渗过程影响进行分析。

我国西部如西南的喀斯特地区,有大量的土石丘陵山区存在,黄土高原的崂山-黄龙山梢林区、桥

山子午岭^[9]等次生林区的土壤中也含有大量碎石。针对含有碎石土壤的研究在我国有待开展,国外的研究在动态模拟等方面遇到的问题也急需解决,对于土石混合介质的水分养分的研究亟待进行。

1 材料与方法

1.1 供试样品

研究样品为土石混合介质。混合介质中的土壤样品为^{渭河滩}土与^{渭河滩}沙土的混合土样。^{渭河滩}土(钙积土垫旱耕人为土)采自西北农林科技大学农作一站试验地(休闲),在试验田内随机抽取 60 个约 2m²的正方形区域,除去耕层 0~10cm 左右土壤,用小铲铲平,取 30 cm 深。土样充分风干后^[10,11]粉碎,过 2 mm 土筛。土壤初始含水量为 10gkg⁻¹。砂土采自杨凌渭河滩,风干后与^{渭河滩}土以质量比 3:7 均匀混合,利用英国马尔文公司生产的 MS2000 激光粒度分析仪进行颗粒分析,土壤粒级分析结果见表 1,按国际土壤颗粒质地分类标准^[2],供试土样为砂质壤土。试验所用碎石,采自陕西杨凌渭河滩,为光滑椭圆形硬质鹅卵石,几乎不渗水。洗净风干后用不同直径的不锈钢筛将碎石筛分成 4 组直径范围,分别介于 0.2~0.5 cm、0.5~1.0 cm、1.0~3.0 cm、3.0~4.0 cm。

*国家自然科学基金项目(50479063,40025106 和 90102012)资助

†通讯作者

作者简介:周蓓蓓(1982~),女,江苏徐州人,博士研究生,研究方向为土壤物理学

收稿日期:2006-06-20;收到修改稿日期:2006-10-05

表1 混合土样的颗粒组成
Table 1 Particle distribution of mixed soil sample

颗粒含量 Particle contents (%)					
<0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.1 mm	0.1~0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm
1.86	4.70	73.8	14.4	4.47	0.50

1.2 试验方法

采用一维垂直定水头入渗法测定混合介质的入渗过程。为便于观察试验过程,混合介质的填装柱选用厚1 cm的有机玻璃柱制作,内径30 cm,高55 cm,底部为厚1 cm的有机玻璃板,并均匀分布内径0.5 cm的细孔;供水马氏瓶采用内径15 cm,高50 cm有机玻璃柱制作,供水水头控制在5 cm左右。

将土样与4组不同直径范围的碎石分别按碎石质量含量0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%混合,共设置28个处理,0%为不加碎石的对照试验,每个处理3个重复。按土样容重 1.3 g cm^{-3} 、碎石 2.87 g cm^{-3} 分层(5 cm)称重并充分混合均匀后装入有机玻璃柱中。有机玻璃柱底部填放滤纸和纱布,防止土样颗粒流失。试验过程中,记录马氏瓶中的水面高度和湿润峰的垂直深度随时间的变化。每10 min观测一次,直至湿润峰达到土柱底部为止。整个试验过程试验室温度在21℃左右。

2 结果与分析

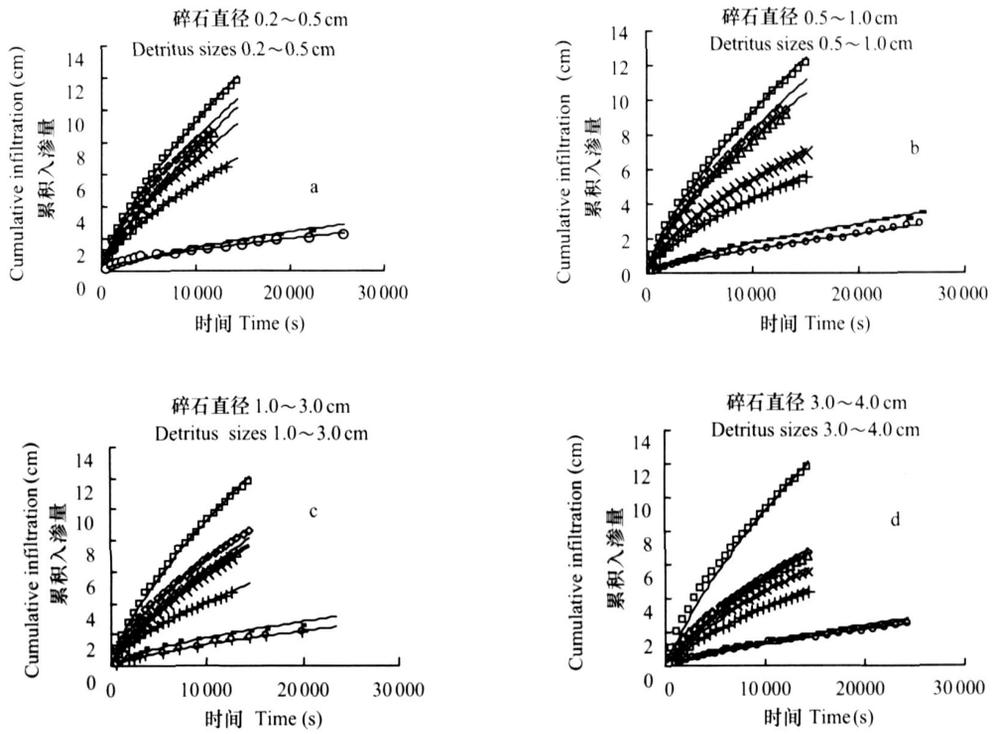
2.1 不同碎石含量和碎石直径对累积入渗量及入渗参数的影响

2.1.1 不同碎石含量对累积入渗量的影响 为便于比较,一维垂直入渗的累积入渗量用入渗水深(cm)表示^[12]。根据实测数据,将不同碎石含量的土样和均质土壤的累积入渗量随入渗历时的变化过程绘于图1。从图中可以看出,累积入渗量均随时间延长呈增大趋势。随着碎石含量的增加,相同入渗历时内,累积入渗量减小;在入渗的初始阶段,水势梯度较大,基质势为影响累积入渗量的主要因素,因此本试验最初的十几分钟内,碎石含量对累积入渗量影响差异性不显著;随入渗过程的进行,土壤逐渐湿润,碎石含量对累积入渗量的影响逐渐表现出来。碎石直径介于0.2~0.5 cm和0.5~1.0 cm时,一定

入渗历时内累积入渗量在0%~40%的碎石含量虽有减小趋势,但差异性较小,当碎石含量达到50%和60%时,单位入渗历时累积入渗量迅速减小,碎石含量对累积入渗量的影响极显著。碎石直径介于1.0~3.0 cm及3.0~4.0 cm时,累积入渗量具有明显的差异。这可能主要因为随碎石含量的增加,大孔隙数量增加,土壤有效孔隙减小,水分运动通道曲折复杂。大孔隙的产生会促进水分入渗,而后两者会限制水分入渗。当前者效应大于后者时,单位入渗历时内的累积入渗量增加,反之减小。Mehuys等^[13]研究指出,随不透水碎石含量的增加,水分的运动受限制。且本试验所选碎石为表面光滑的硬质鹅卵石,透水性极低,易与土紧密接触;加之填装过程中,土样与碎石充分均匀混合后分层填装,大孔隙作用不明显,土壤水分通道及有效孔隙为主要影响因素。因此,本试验中累积入渗量随碎石含量增大而降低。

2.1.2 不同碎石直径对累积入渗量的影响

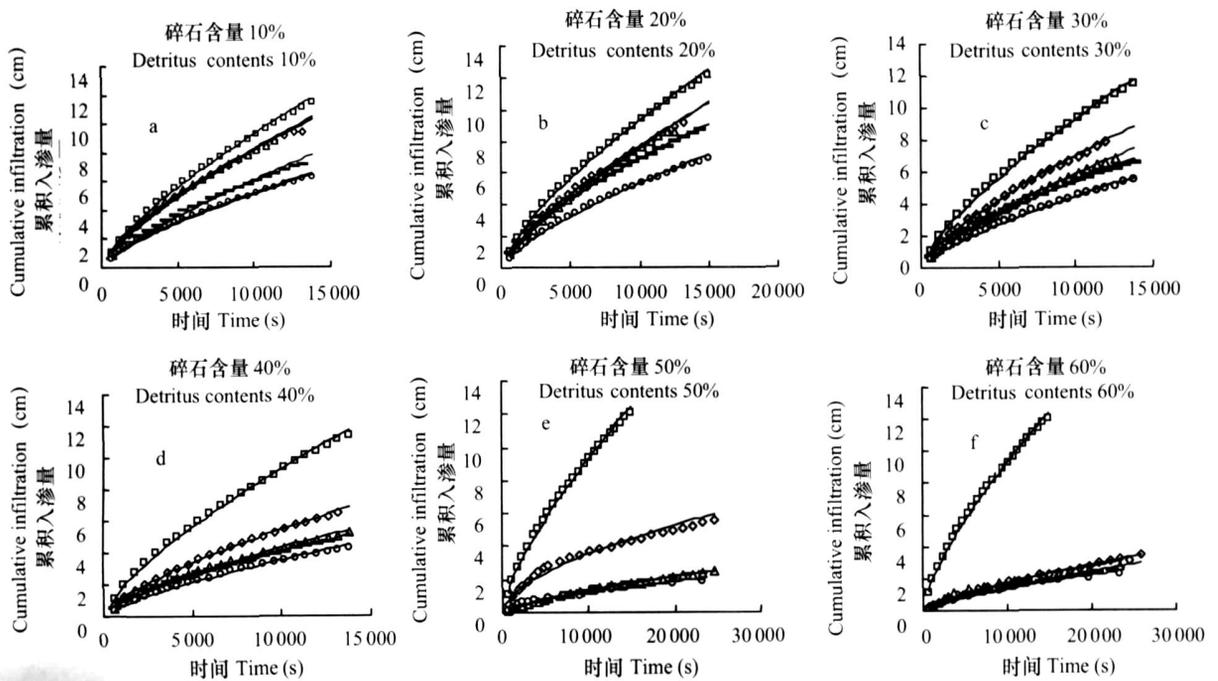
将不同碎石直径的土样和均质土壤的累积入渗量随入渗历时的变化绘于图2。由图2可以看出,累积入渗量随入渗时间的延长而增大,且一定入渗历时的累积入渗量随碎石直径增大而减小。如前所述,入渗初始阶段累积入渗量随碎石直径变化甚小,随入渗时间推移,碎石直径对累积入渗量的影响作用逐渐显著。在一定入渗历时内,累积入渗量均随碎石直径增加而减小,碎石直径越大,减小效果越显著。综合图2可以看出,在碎石含量较低(本试验为10%、20%、30%、40%)时,累积入渗量随碎石直径变化显著,当碎石含量达到50%和60%时,碎石与土壤仍能均匀混合,土壤过水断面逐渐接近最小极限,此时,碎石直径对累积入渗量随时间变化影响较小,曲线重叠性较大。Wilcox等^[14]研究指出,碎石直径与土壤入渗能力具有较好的负相关性,且碎石直径越小,这种负相关性越显著,与本研究结果相符。因此本试验累积入渗量并非一直随碎石直径均匀减小。



对照 Contrast 碎石含量 10% Detritus contents 10% △碎石含量 20% Detritus contents 20% ×碎石含量 30% Detritus contents 30% + 碎石含量 40% Detritus contents 40% - 碎石含量 50% Detritus contents 50% 碎石含量 60% Detritus contents 60%

图 1 碎石含量对累积入渗量随时间变化的影响

Fig. 1 Effect of detritus content on variation of cumulative infiltration with time



对照 Contrast 碎石直径 0.2~0.5 cm Detritus sizes 0.2~0.5 cm △碎石直径 0.5~1.0 cm Detritus sizes 0.5~1.0 cm - 碎石直径 1.0~3.0 cm Detritus sizes 1.0~3.0 cm 碎石直径 3.0~4.0 cm Detritus sizes 3.0~4.0 cm

图 2 碎石直径对累积入渗量随时间变化的影响

Fig. 2 Effect of detritus size on variation of cumulative infiltration with time

为进一步研究碎石含量和直径对累积入渗量的影响,根据累积入渗量随时间变化的趋势,采用 Kostinakov 入渗模型^[13]对累积入渗量变化过程进行拟合:

$$I = Kt^r$$

式中 I 为累积入渗量 (cm); t 为入渗历时 (s); K 和

为经验系数。拟合结果见表 2。经统计检验,均达到显著水平(取显著水平为 0.01),由相关系数来看,上述相关系数均大于临界相关系数 $r_d = 0.983$,因此,与均质土壤相同, Kostinakov 模型可以反映含有碎石的土壤累积入渗量变化过程。

表 2 不同碎石含量及碎石直径条件下累积入渗量随时间变化过程的拟合结果

Table 2 Fitting variation of cumulative infiltration with time in soils different in content and size of detritus

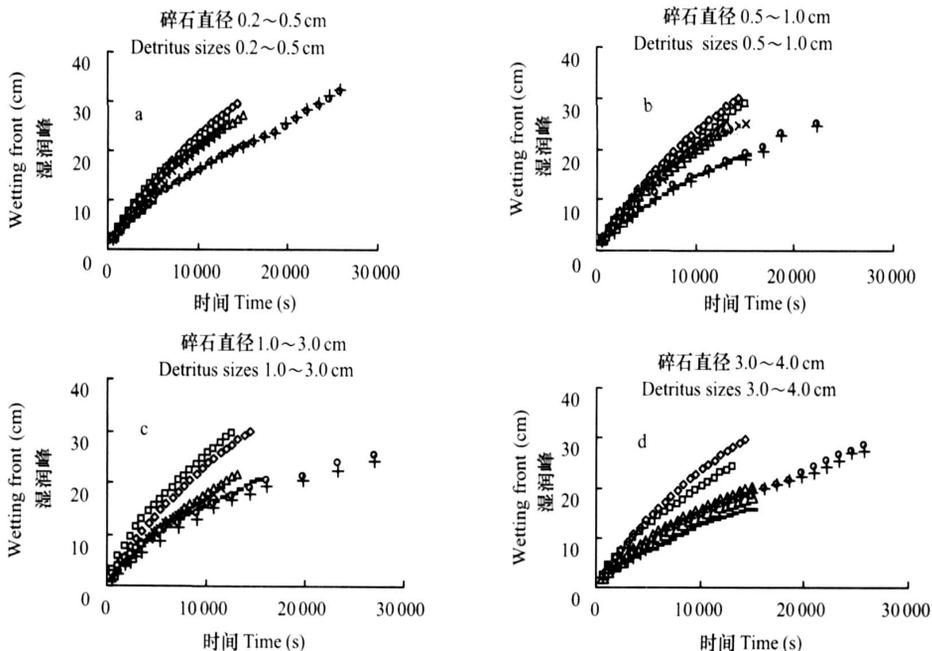
碎石直径 Rock detritus sizes	相关系数 Correlation coefficient r						
	0% ⁽¹⁾	10%	20%	30%	40%	50%	60%
0.2~0.5 cm	0.997 7	0.995 6	0.997 7	0.998 4	0.999 2	0.997 1	0.994 1
0.5~1.0 cm	0.997 7	0.999 1	0.998 2	0.998 9	0.996 3	0.980 0	0.997 4
1.0~3.0 cm	0.997 7	0.997 6	0.993 0	0.997 2	0.995 7	0.993 9	0.963 9
3.0~4.0 cm	0.997 7	0.996 7	0.996 5	0.997 8	0.996 0	0.991 7	0.992 0

(1) 碎石含量 Rock detritus content

2.2 不同碎石含量和碎石直径对湿润峰运移的影响

Coleman 和 Bodman^[15]将含水率剖面分为四个区:饱和区、含水率有明显变化的过渡区、含水率变化不大的传导区及含水率迅速减少到初始值的湿润区。湿润区的前缘成为湿润峰。湿润峰的移动是反映水流垂向运动的特征之一,许多下渗运动均建立在这一理论之上。本文从碎石含量和碎石直径两方面对湿润峰运移的影响研究进行分析。

2.2.1 碎石含量对湿润峰运移的影响 由图3可以看出,随入渗过程的进行,湿润峰深度不断增加。在入渗的初始阶段,湿润峰变化速率较大,碎石对于湿润峰运移的影响差异性不大,随着时间推移,湿润峰深度变化曲线趋向平缓,不同碎石含量的土壤湿润峰变化产生差异。单位时间内的湿润峰深度基本随碎石含量的增加而减小。其中,碎石含量为 0%、10%、20%、30% 时,湿润峰深度随时间增加而



对照 Contrast 碎石含量 10% Detritus contents 10% △碎石含量 20% Detritus contents 20% ×碎石含量 30% Detritus contents 30% + 碎石含量 40% Detritus contents 40% - 碎石含量 50% Detritus contents 50% 碎石含量 60% Detritus contents 60%

图 3 碎石含量对湿润峰深度随时间变化的影响

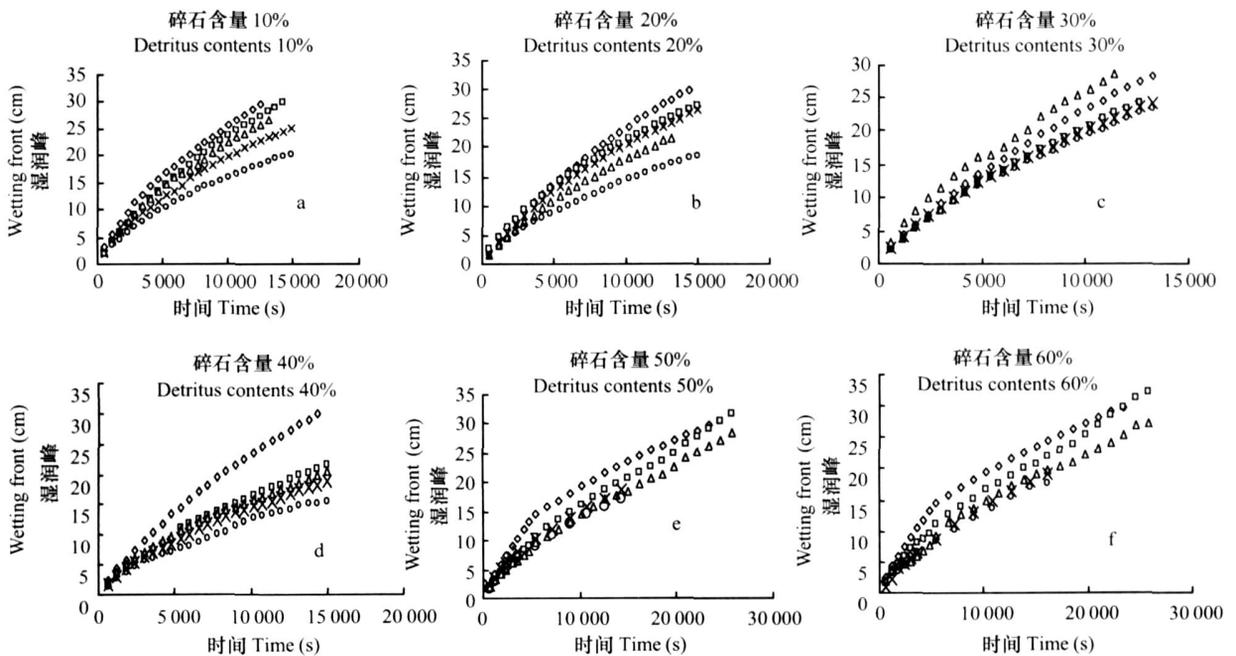
Fig. 3 Effect of detritus content on variation of wetting front with time

减小的趋势明显,当碎石含量达到 40 %、50 %、60 % 时,变化趋势基本相同,曲线重叠性较大;当碎石直径为 1.0 ~ 3.0 cm 时,碎石含量为 40 % 的湿润峰深度变化速率最小;碎石直径为 3.0 ~ 4.0 cm 时,碎石含量为 50 % 的湿润峰深度变化速率最小。碎石含量对湿润峰的影响效果与累积入渗量基本一致,对二者均产生负效应。

一定入渗历时内,随碎石含量增大,进入土壤中的水总量减少,同时碎石渗水率极低,占据了可以进行水分传导的有效土壤孔隙体积,因此将会阻碍湿润峰运移;但一定质量的土壤,碎石含量越大,水分所需湿润的土壤体积减小,将促进湿润峰运移;当前两者效应大于后者时,湿润峰变化速率增大,反之减小;当二者持平时,湿润峰受碎石含量影响较小。本试验中,在碎石含量介于 40 % ~ 60 % 时,两者作用相消,湿

润峰受碎石含量影响较小,变化不明显;碎石直径为 1.0 ~ 3.0 cm 及 3.0 ~ 4.0 cm 时,碎石含量分别为 40 % 和 50 % 时湿润峰深度变化速率最小,也应为两种因素综合对湿润峰深度产生阻碍作用的原因。

2.2.2 碎石直径对湿润峰运移的影响 图4为含有不同直径碎石的土样的湿润峰深度随时间的变化。如上所述,入渗初始阶段,湿润峰变化速率较大,碎石直径对湿润峰深度变化影响不明显;随入渗不断进行,湿润峰深度变化速率随碎石直径增大而减小。理论上,碎石含量一定时,碎石所占土壤孔隙一定,碎石直径对湿润峰运移影响不显著。事实上,在水分湿润土体的过程中,即使碎石下面凹下去的很小的那块土壤面积也要湿润,因此,碎石直径越大,碎石凹陷下所需湿润的土体面积越大,土壤水分通道弯曲度越大,阻碍了湿润峰的前进。



对照 Contrast 碎石直径 0.2 ~ 0.5 cm Detritus sizes 0.2 ~ 0.5 cm △碎石直径 0.5 ~ 1.0 cm Detritus sizes 0.5 ~ 1.0 cm ×碎石直径 1.0 ~ 3.0 cm Detritus sizes 1.0 ~ 3.0 cm 碎石直径 3.0 ~ 4.0 cm Detritus sizes 3.0 ~ 4.0 cm

图4 碎石直径对湿润峰深度随时间变化的影响

Fig. 4 Effect of detritus size on variation of wetting front with time

为充分研究湿润峰随碎石含量及直径的变化趋势,根据曲线形状,采用幂函数对湿润峰深度随时间的变化过程进行拟合,即: $Z = A t^B$; 式中, Z 为湿润峰深度(cm), t 为入渗历时(s), A 、 B 为拟合参数。拟合结果见表 3。

由表 3 可见:用幂函数对混合介质的湿润峰深

度的变化过程进行拟合,其相关系数均大于 0.99, 有较好的相关关系。因此,与均质土壤一样,含有碎石的土样的湿润峰深度随时间的关系也遵从幂函数规律。邹焱等^[16]对红壤进行积水入渗后研究指出,湿润峰深度与时间的平方根亦成幂函数关系。

表3 不同碎石含量及碎石直径条件下累积入渗量随时间变化过程的拟合结果

Table 3 Fitting of variation of wetting front with time in soils different in content and size of rock detritus

碎石直径 Rock detritus sizes	相关系数 Correlation coefficient						
	0 % ⁽¹⁾	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %
0.2~0.5 cm	0.999 0	0.994 3	0.999 2	0.997 4	0.996 8	0.998 0	0.992 0
0.5~1.0 cm	0.999 0	0.995 2	0.998 4	0.999 8	0.999 3	0.984 8	0.998 3
1.0~3.0 cm	0.999 0	0.999 7	0.997 0	0.993 5	0.997 0	0.996 1	0.995 2
3.0~4.0 cm	0.999 0	0.998 9	0.996 0	0.994 5	0.994 5	0.997 1	0.996 9

(1) 碎石含量 Rock detritus content

3 讨论

本文针对 7 种碎石含量及 4 种碎石直径对土壤入渗过程影响研究进行了分析,其不同碎石含量及直径条件下的累积入渗量、湿润峰深度随时间变化相关性显著,但仍然具有一定的局限性。碎石对于土壤入渗过程的影响的因素具有多方面性。自然土壤中的碎石结构及形状不规则,Rawls 等^[17]发现,碎石结构形状也是造成土壤水分入渗变化的原因;碎石在土壤中的空间位置对入渗速率的增大减小影响不容忽视,Boesen 等^[5]指出碎石在土壤中的位置是影响入渗的重要因素之一;本文研究石样为形状规则、几乎不透水的鹅卵石,事实上土壤中碎石种类繁多,不同碎石对入渗过程的影响具有较大差异性,Cousin 等^[18]研究指出,碎石的存在位置及来源同样影响水分入渗。因此,今后还需继续综合以上因素,进行土石混合介质的水分养分深入研究。

4 结论

本文在室内条件下,用定水头法研究分析不同的碎石含量及直径对入渗过程的影响,并对其原因进行了探讨,得出以下结论:

1) 当碎石直径一定时,一定入渗历时内的累积入渗量随碎石含量的增加而减小,碎石直径较大时,碎石含量对累积入渗量的影响显著;当碎石含量一定时,一定入渗历时内的累积入渗量随碎石直径的增大而减小,且碎石含量较低时,碎石直径对累积入渗量的影响差异性显著。

2) 均质土壤与含有碎石的土壤的累积入渗量与时间变化符合 Kostiakov 入渗模型。

3) 单位时间内的湿润峰深度随碎石含量的增加而减小。其中,碎石含量低于 30 % 时,湿润峰深度随时间增加而减小的趋势明显,当高于 40 % 时,

曲线重叠性较大,影响不显著。

4) 湿润峰深度随时间的变化成幂函数关系。

5) 不同碎石含量及直径对土壤累积入渗量和湿润峰的影响效应基本一致,一定入渗历时内,二者均与碎石含量及直径成负相关性。

参考文献

- [1] Meyer L D, Johnson C B, Foster G R. Stone and woodchip mulches for erosion control on construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1972, 27: 264 ~ 269
- [2] Grant W J, Struchtemeyer R A. Effect of stones on runoff, erosion, and soil moisture. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1966, 30: 638 ~ 640
- [3] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 171 ~ 175. Fu S H. Effect of soil containing rock fragment on infiltration (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 171 ~ 175
- [4] Reigner I C, Phillips J J. Variations in bulk density and moisture content within two new Jersey coastal plain soils, Lakeland and Lakehurst sands. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1964, 28: 287 ~ 289
- [5] Boesen J, Lavee H. Rock fragments in top soil: Significance and process. *Catena*, 1994, 23: 1 ~ 28
- [6] Grant R, Struchtemeyer R A. Influence of coarse fraction in two Marine potato soils on infiltration, runoff and erosion. *Soil Sci. Soc. of Am. Proc.*, 1959, 23: 391 ~ 394
- [7] Abrahams A D, Parsons A J. Hydraulic of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces. *Catena*, 1994, 23: 111 ~ 140
- [8] Valentin C. Surface sealing as affected by various stock fragment covers in West Africa. *Catena*, 1994, 23: 87 ~ 97
- [9] 张信宝, 安芷生. 黄土高原地区森林与黄土厚度的关系. *水土保持通报*, 1994, 14(6): 1 ~ 3. Zhang X B, An Z S. Relationship between forests and loess thicknesses in the Loess Plateau region (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14(6): 1 ~ 3
- [10] 缴锡云, 王文焰, 张建丰. 单点膜孔入渗特性的试验研究. *水利学报*, 1999, (7): 33 ~ 39. Jiao X Y, Wang W Y, Zhang J F. Experimental research on soil infiltration from single hole of membrane (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, (7): 33 ~ 39
- [11] 王全久, 邵明安. 非饱和土壤导水特性分析. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(6): 16 ~ 22. Wang Q J, Shao M A. Comparison analysis of capacity of water transfer in unsaturated soil (In Chi-

- nese). *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1998, 4(6): 16 ~ 22
- [12] 刘建国,王洪涛,聂永丰. 多孔介质非饱和导水率预测的分型模型. *水科学进展*, 2004, 15(3): 269 ~ 275. Liu J G, Wang H T, Nie Y F. Fractal model for predicting of unsaturated hydraulic of porous media (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2004, 15(3): 269 ~ 275
- [13] Mehuis G R, Stolzy L H, Letey J, *et al.* Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1975, 39: 37 ~ 42
- [14] Wilcox B P, Wood M K, Tromble J M. Factors influencing infiltration of semiarid mountain slopes. *Range Manage*, 1988, 41(3): 197 ~ 206
- [15] Bodman C B, Coleman E A. Moisture and energy conduction during down - ward entry of water into soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1944, 2(8): 166 ~ 182
- [16] 邹焱,陈洪松,苏以荣,等. 红壤积水入渗及土壤水分再分布规律室内模拟试验研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 174 ~ 177. Zou Y, Chen H S, Su Y R, *et al.* Study on ponded water infiltration and soil water distribution in red soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 174 ~ 177
- [17] Rawls W J, Brakensiek D L, Simanton J R, *et al.* Prediction of soil cover and soil rock for rangeland infiltration. *Range Manage*, 1988, 41(4): 307 ~ 308
- [18] Cousin I, Nicoulland B, Coutandeur C. Influence of rock fragment on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 2003, 53: 97 ~ 114

EFFECT OF CONTENT AND SIZE OF ROCK DETRITUS ON INFILTRATION

Zhou Beibei^{1,2} Shao Ming'an^{2,1†}

(1 College of Resources and Environment, Northwest Sci - Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract As a result of soil forming process and human activities, rock fragments or detritus exist in soils, different in contents and sizes. Their presence does have some effects on some physical properties of the soil as well as water infiltration process. Based on the experiment of vertical infiltration in lab, effects of content of rock fragments (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% and 60%) and size of the detritus (0.2 ~ 0.5cm, 0.5 ~ 1.0 cm, 1.0 ~ 3.0 cm and 3.0 ~ 4.0 cm) on water infiltration were studied. The purpose of this study is to determine effect of rock fragments different in content and size on water infiltration process and find out its mechanisms.

Key words Cumulative infiltration; Wetting front; Content of rock fragments; Size of rock fragments