

覆土厚度对裸岩石砾地土壤颗粒迁移过程的影响

张 扬^{1,2}, 李占斌^{1,3}, 董起广², 袁水龙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, 西安 710048;

2. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075;

3. 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实验室, 陕西, 杨凌 712100)

摘要: 为了明确裸岩石砾地土地整治工程中人为构建耕作层的合理覆土厚度, 通过室内土柱模拟试验, 研究了覆土厚度对裸岩石砾地土壤颗粒迁移过程的影响。根据裸岩石砾地土地整治工程特点, 试验共设计 4 个覆土厚度, 分别为 5, 10, 15, 20 cm, 土柱底部装填 5 cm 厚直径为 10 mm 的玻璃珠, 试验从土柱下端出水开始计时, 共接取渗滤液 6 h。结果表明: (1) 较厚的土层具有较好的保水蓄水能力和较强的土体稳定性, 4 个土层厚度的水分渗透量均随着土层厚度增加而减小, 水分渗透速率表现为先增大后减小, 最终趋于稳定的趋势; (2) 土壤颗粒迁出量与土层厚度呈负相关关系, 土壤颗粒累积迁出量与土层厚度的拟合关系式为: $y = 3.19e^{-0.11x}$ ($R^2 = 0.96$); (3) 水分渗漏前期往往伴随着大量土壤颗粒的迁出, 且土层越薄, 水分渗透量和土壤颗粒迁出量越大, 随着渗漏过程的进行土壤颗粒迁出量逐渐减小; (4) 迁出颗粒中粉粒含量最高, 黏粒次之, 砂粒含量最低, 且不同粒径土壤颗粒随时间的迁出特征也不同。研究结果为裸岩石砾地土地整治提供了科学依据。

关键词: 覆土厚度; 裸岩石砾地; 水分渗漏; 土壤颗粒迁移

中图分类号: S152.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0087-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.013

Experimental Study on Influence of Overburden Thickness on Soil Particle Transport Process in Bare Rock Gravel Land

ZHANG Yang^{1,2}, LI Zhanbin^{1,3}, DONG Qiguang², YUAN Shuilong²

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;

2. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co. Ltd.,

Xi'an 710075; 3. State Key Laboratory of soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to clarify the reasonable soil thickness of man-made tillage layer in the bare rock and gravel land remediation project, a simulation experiment of indoor soil column was conducted. The effect of soil thickness on particle migration process in bare rock and gravel soil was studied. According to the characteristics of bare rock and gravel soil reclamation project, the soil layers thickness treatments included 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm respectively. The bottom of the column was filled with the 5 cm thick glass beads with a diameter of 10 mm. From the start of water seepage from the bottom of the soil column, the collecting test of leakage fluid was taken for 6 h. The results showed that: (1) The thicker soil had greater water retaining capacity and stronger stability. The water leakage in the four soil layers decreased with the increasing soil thickness. The water leakage rate increased at first and then reduced, ultimately, tended to be stable. (2) The migration quantity was negatively correlated with the soil thickness, showing an exponential function of $y = 3.19e^{-0.11x}$ ($R^2 = 0.96$). (3) The water leakage was often accompanied by the migration of the soil particles in the earlier stage, and the thinner the soil thickness was, the greater amount of water leakage and soil particles were. As the leakage process progressed, the quantity of soil particles migration was gradually decreased. (4) The content of silt was the highest in the migration particles, followed by the clay, and the sand content was the lowest. The migration characteristics of different soil particles varied with

收稿日期: 2017-07-19

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (41330858)

第一作者: 张 扬 (1984—), 女, 在读博士, 高级工程师, 主要从事水土保持与土地工程研究。E-mail: zhangyang_dj@163.com

通信作者: 李占斌 (1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhanbinli@126.com

time. These findings provide scientific basis for the development and consolidation of bare rock gravel land.

Keywords: soil thickness; bare rock gravel land; water leakage; soil particles migration

土层厚度作为植物生长的主要限制因子,不仅关系着地上生物量和植被盖度^[1-3],同时也是陆地水文过程和土壤肥力的重要影响因素^[4-5]。有研究^[6]表明,在矿区复垦中覆土厚度对土壤保水蓄水能力影响显著;蒋忠诚等^[7]对西南岩溶山区的石漠化和水土流失过程进行了研究,结果表明水土流失量与土壤厚度等指标之间存在多元线性关系;陈佳等^[8]探讨了在小流域内土层厚度对土壤水分时空格局的影响,指出土层厚度通过影响土壤性质、地表植被和水文过程,进而影响土壤水分的时空异质性。土壤颗粒迁移是发生在土壤中最为普遍的土壤物理过程,在土壤发生和土壤物质迁移过程中具有重要作用,土壤颗粒能够作为养分和污染物的载体与养分和污染物共同迁移。裸岩石砾地作为一种广泛分布的未利用土地类型^[9],制约其开发利用的主要原因是该地类地表砾石遍布,土层极其浅薄。通过人为覆土构建稳定耕作层是对此类土地进行综合整治的常用方法^[10-12]。由于降水、灌溉等因素的影响,砾石间较大的空隙分布极易造成上层覆土中土壤颗粒的流失,因此研究不同覆土厚度下土壤颗粒在多孔介质中的迁移规律对于维持新建耕作层的稳定和作物高产具有重要意义。国内外学者对多孔介质中颗粒的迁移过程及其影响因素进行了大量研究,Bradford 等^[13]研究了多孔介质孔隙大小对颗粒迁移过程的影响,结果表明当多孔介质孔隙空间小到阻碍颗粒的迁移时,颗粒应变力开始发挥主要作用;Rosenbrand 等^[14]通过渗透试验研究了孔隙水盐度、渗流速度和温度对微颗粒在贝雷亚砂岩中迁移过程的影响;还有学者研究了多孔介质的物理结构对颗粒迁移过程的影响^[15]。但目前国内外关于土层厚度对多孔介质中土壤颗粒迁移过程的影响研究还鲜有报道。本文通过室内土柱模拟试验,分析不同土层厚度下土壤颗粒在多孔介质中的迁出特征及迁出颗粒的级配特征,揭示覆土厚度对裸岩石砾地土壤颗粒迁移过程的影响机制,以期为我国裸岩石砾地开发整治提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验采样地位于渭南市富平县杜村镇,地处 108°57′—109°26′E, 34°41′—35°06′N。该区属半干旱大陆性气候,多年平均气温 13.1℃,年平均降雨量 533.3 mm,年平均蒸发量 1 012.7 mm,年内降雨分布不均,多集中在 7—9 月。土壤为黄绵土,采样时间为 2017 年 2 月,在当地 0.03 km² 农田范围内,随机

选取 3 个样点,用铁锹除去表层 0—10 cm 含杂质土壤后,取 10—30 cm 范围内的土壤。将所取土样充分混合带回实验室自然风干、研磨,去除根系等杂物,过 2 mm 筛,由烘干法测得室内装填土壤含水量为 4.2%,通过马尔文 MS 2000 激光粒度仪测定土壤粒径组成,<0.002 mm 粒径占 10.1%,0.002~0.05 mm 粒径占 78.8%,>0.05 mm 粒径占 11.1%。按照美国农业部制土壤质地分类标准,供试土壤为粉壤土。

1.2 试验方法

通过一维垂直土柱入渗试验装置模拟覆土厚度对裸岩石砾地土壤颗粒迁移过程的影响。试验装置由供水系统和试验土柱两部分组成,供水系统采用马氏瓶进行定水头自动供水,积水深度为 2 cm。试验土柱选用内径为 10 cm、高 50 cm 的有机玻璃柱,玻璃柱底部装有均匀分布、直径为 2.5 mm 的细孔板,以利于水分和土壤颗粒的排出。以粒径为 10 mm 的均质玻璃珠构建底层多孔介质模拟裸岩石砾地的石砾结构。土柱下部统一填装 5 cm 厚的均质玻璃珠,其上设定 4 个不同土层厚度的处理方式,分别为 5, 10, 15, 20 cm,并按照自然容重(1.2 g/cm³)进行填装,玻璃柱下方用量筒接取携带有迁移颗粒的渗漏水。土柱填装完成后,表面放置滤纸,防止表层土壤受到剧烈的冲击。试验从土柱下端出水开始计时,每隔 5 min 接取 1 次水样,随着渗漏量的减少,适当增大取样间隔,共接取 6 h。水的体积通过量筒直接量取,将收集的渗漏水立即加入 HACH2100Q 便携式浊度计的试样容器中,用不起毛的软布擦拭试样容器,接着给试样容器涂抹一层硅油,并再次用软布进行擦拭,最后放入浊度计容器室中测量浊度。剩余的渗漏水静置过滤后,烘干称重进行土壤颗粒含量测定,每个试验重复 3 次。

1.3 数据分析与处理

采用 SPSS 21.0 对试验数据进行统计及单因素方差分析,使用 Origin 8.5 制图。

渗漏速率计算公式为:

$$f=v/t \quad (1)$$

式中: f 为土壤水分渗漏速率(mL/min); v 为渗漏水量(mL); t 为渗漏时间(min)。

2 结果与分析

2.1 土层厚度对水分渗漏过程的影响

土壤颗粒迁移过程受到土壤物理化学参数及机械动力(水动力)等多种因素的影响,其中水动力作用更是颗粒迁移的动力基础^[12]。土壤颗粒迁移伴随着

水分渗漏过程的进行,因此首先对不同土层厚度下水分渗漏过程进行了分析。由图 1 可以看出,随着渗漏历时的增加,5 cm 厚度土层水分的累积渗漏量增加趋势最为明显,360 min 累积渗漏量最大,达 578 mL。对 4 个土层厚度水分过程进行单因素方差分析表明,5 cm 厚度土层水分渗漏量显著高于其他土层 ($p<0.05$)。对比 4 条累积入渗曲线可以看出,土层厚度越大渗漏量越小,20 cm 厚度土层的累积渗漏量最小,仅为 5 cm 厚度土层累积渗漏量的 35.6%,说明土层越厚,土壤的蓄水保水能力越强。

图 2 为不同土层厚度下水分渗漏速率的变化过程。从图 2 可以看出,土层厚度越大,0~360 min 时段内的土壤渗漏速率越小。土层厚度为 5 cm 时,0~360 min 时段内的渗漏速率最大,为 1.6 mL/min;土层厚度为 20 cm 时,0~360 min 时段内的渗漏速率最小,为 0.6 mL/min。从渗漏速率的变化过程可以看出,4 个土层厚度下,水分渗漏速率均呈先增大后减小,最后趋于稳定的趋势。这是因为开始渗漏时,水分会携带细颗粒流出,随着细颗粒带出,土壤内部孔径变大,渗漏速率变大;当土壤颗粒随水分向下迁移至下层多孔介质时,导致多孔介质的堵塞,进而影响水分的渗漏,使得水分渗漏速率又开始下降,并趋于稳定。

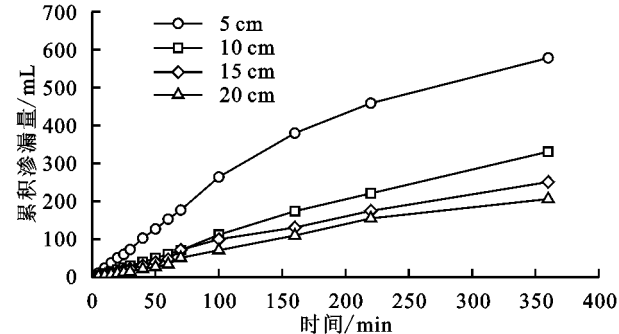


图 1 不同土层厚度下水分渗透累积过程

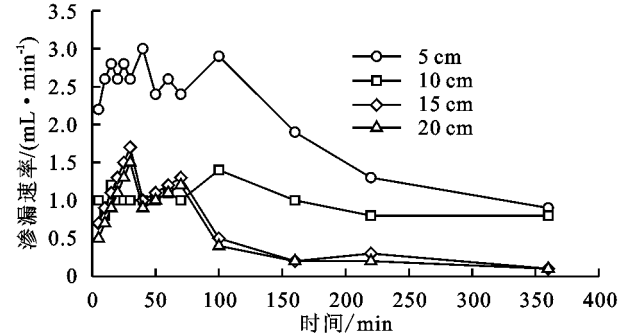


图 2 不同土层厚度下水分渗透速率变化过程

2.2 土层厚度对土壤颗粒迁移过程的影响

土壤悬浮颗粒在运移过程中,会受到多孔介质的影响,截留部分土壤颗粒^[16-18]。而水流在土壤中垂直向下运动,土壤颗粒受到水流的冲刷和自身重力的作用,会有部分颗粒向下迁移至多孔介质甚至流出土柱。通过测定渗漏水中土壤颗粒的质量,研究土层厚

度对土壤颗粒迁移过程的影响,由图 3 可以看出,土层越薄,土壤颗粒迁出量越大;土层越厚,土壤颗粒迁出量越小。土层厚度为 5 cm 时,360 min 内土壤累积迁出量为 2.02 g,且实际试验中观测发现,当 5 cm 土层充分饱和后,出现了整体崩塌流失现象;土层厚度为 20 cm 时,360 min 内土壤累积迁出量为 0.44 g,仅为 5 cm 土层累积迁出量的 21.8%。对比 4 个土层厚度的颗粒迁出量累积曲线可知,土壤累积迁出量主要集中在前 100 min 内,分别占总迁出量的 90.0%,76.4%,57.1%,79.6%,之后仅有少量的土壤颗粒迁出。由土层厚度与土壤累积迁出量之间的拟合关系曲线(图 4)可以看出,土壤累积迁出量随着土层厚度的增加逐渐减少,并趋于稳定,由曲线可以推断出存在某一临界土层厚度,当大于该厚度时,土壤颗粒迁出量保持稳定。

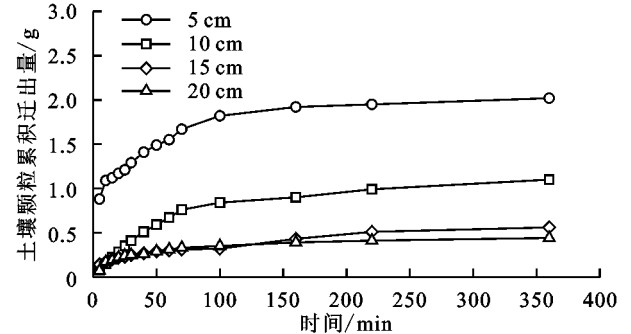


图 3 不同土层厚度下土壤颗粒累积迁出量

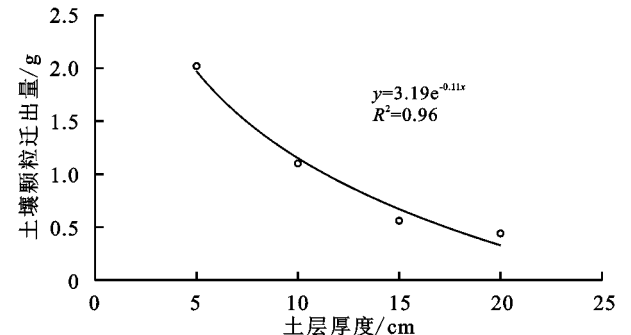


图 4 土层厚度与土壤颗粒累积迁出量的关系

在裸岩石砾地上构建稳定耕作土层,覆土厚度是影响耕作土层稳定性的一个重要因素。试验结果显示,5 cm 厚的土层随着土壤含水量达到饱和后出现了整体的崩塌效应,而随着土层厚度的增加,类似的现象没有再次出现,说明土层厚度的增加有利于耕作层的稳定。分析认为土层厚度较小时,土壤颗粒的迁出路径较短,且土体的稳定性较差^[19],因此土壤颗粒容易迁出,而且当土壤颗粒大量迁出时容易造成土体的崩塌;另一方面,表层土壤颗粒由于水流作用而向下迁移,向下迁移的土壤颗粒容易堵塞下层土壤空隙,当土层厚度较小时,土壤颗粒的迁移路径较短,堵塞下层土壤孔隙的概率较小,因此土壤颗粒容易穿过土层,进入多孔介质迁出;当土层较厚时,土壤颗粒的

迁移路径变长,堵塞下层土壤孔隙的概率变大,容易造成下层土壤孔隙的堵塞,因此土壤颗粒不易穿过土层而迁出。

2.3 水分渗漏量对土壤颗粒迁移过程的影响

自然条件下土壤颗粒迁移更多的是受到土壤中水分运动的影响。由图 5 可以看出,4 个土层厚度下土壤颗粒累积迁出量与累积渗漏水量之间具有较好的相关性,土壤颗粒累积迁出量均随土壤水分累积渗漏量的增加而增加,并最终趋于稳定。土层厚度为 5 cm 时,渗漏水与颗粒迁出量均最大,随着土层厚度的增加,土壤颗粒累积迁出量与土壤水分累积渗漏量均逐渐减小。

图 6 为不同土层厚度下渗漏水中土壤颗粒浓度随时间的变化情况。从图 6 可以看出,4 个土层厚度下随着渗漏时间的增加,渗漏水中土壤颗粒浓度均呈逐渐减小的趋势,并在 100 min 时渗漏水中的土壤颗粒浓度趋于稳定,这主要是由于随着土壤中细颗粒向

下迁移,填充至多孔介质的土壤颗粒逐渐增多,多孔介质孔隙率减小,阻碍了颗粒的迁移。无论是渗漏开始还是渗漏稳定阶段,渗漏水中土壤颗粒浓度均呈现随土层厚度的增加而减小的规律。5 cm 土层厚度的初始阶段渗漏水中土壤浓度达到 80.7 mg/kg,为 20 cm 土层厚度下的 3 倍,渗漏稳定后两者的差距减小,渗漏水中土壤浓度降至 3.5 mg/kg,仅为 20 cm 土层厚度下的 1.7 倍。

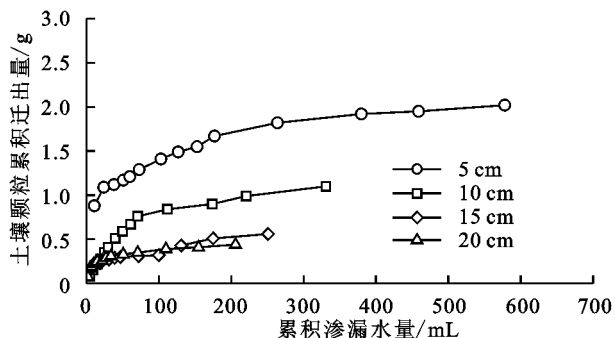


图 5 土壤颗粒迁出量与水分渗漏量间的关系

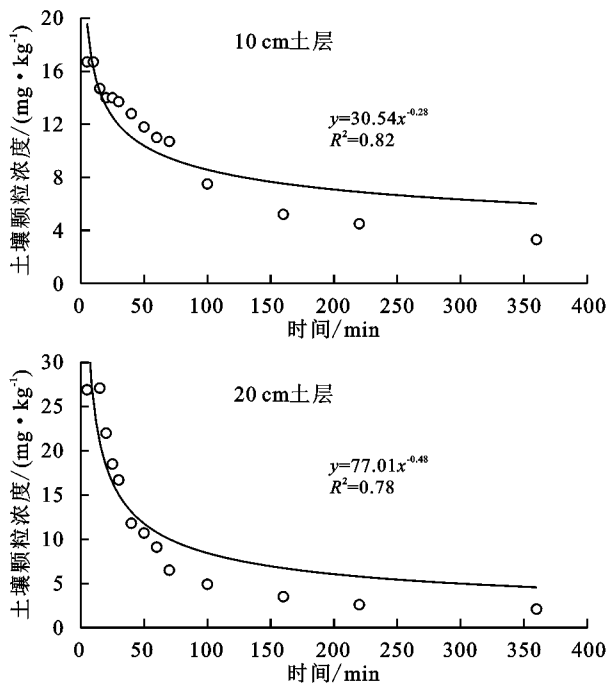


图 6 不同土层厚度下渗漏水中土壤颗粒浓度变化

2.4 渗漏水溶液的土壤颗粒浊度分布特征

浊度变化是反映溶液中溶质含量的一个量化指标,对于土壤渗漏水,分析浊度大小与时间的变化关系是间接反映多孔介质上层土壤稳定性的一个重要指标。从图 7 可以看出,渗漏水浊度随渗漏时间的增加而显著降低,且主要发生在渗漏前期 0~100 min,在此之后渗漏水浊度变化不大,4 个土层厚度间无显著性差异($p > 0.05$),土壤颗粒随渗漏水迁移量逐渐趋于稳定。

选择 10 cm 土层厚度渗漏水分析渗漏水中土壤颗粒级配特征见图 8。从图 8 可以看出,渗漏水中土壤颗粒粒径分布在 0.002~0.05 mm 范围内的土壤颗粒约占

80%。迁出不同粒径土壤颗粒含量随时间变化见图 9。

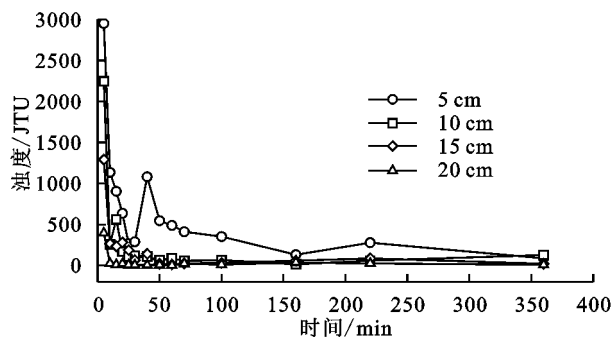


图 7 不同厚度土层土壤颗粒渗漏水浊度随时间变化特征

由图 9 可以看出,渗漏水中粉粒(0.002~0.05 mm)

含量最高,黏粒(<0.002 mm)次之,砂粒含量(>0.05 mm)最小;渗漏液中黏粒(<0.002 mm)含量和粉粒(0.002~0.05 mm)含量随渗漏时间的增加呈先增大后趋于稳定的变化趋势,砂粒(>0.05 mm)含量呈先减小后趋于稳定的变化趋势。无论增大或减小,这种变化主要发生在渗漏开始后的 0~100 min 内,超过 100 min 后,两种变化均趋于稳定。

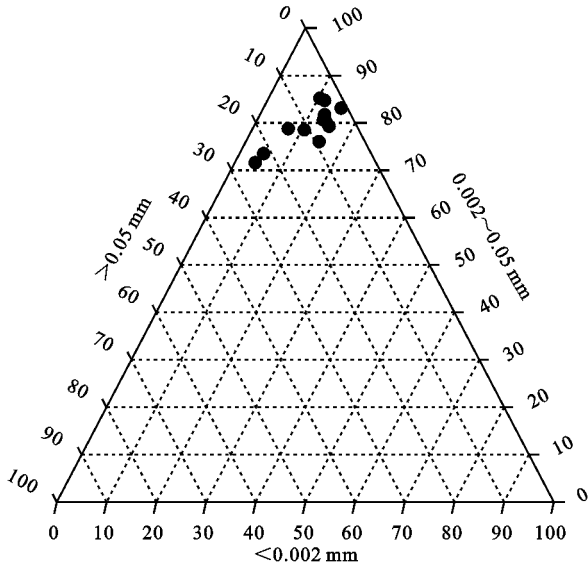


图 8 10 cm 土层渗漏液中土壤颗粒粒径组成

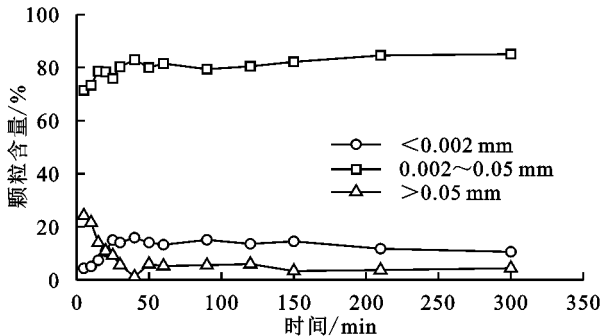


图 9 10 cm 土层渗漏液中不同粒径含量随时间变化过程

土壤黏粒的粒径最小,最容易被水流携带迁出,但在渗漏液中黏粒含量并不是最多的,这是因为土壤黏粒粒径尽管很小,但具有较强的吸附性,毛管水中的黏粒极易被毛管吸附^[20],同时随着毛管孔隙的阻塞,也阻止了黏粒的向下运动;土壤砂粒由于粒径较大,不易被毛管水搬运,在渗漏初期,由于土层的不稳定性和边壁效应,渗漏液中砂粒含量较大,随着渗漏时间的延长,砂粒含量逐渐减小(图 9)。试验用土本身粉粒含量较大,是渗漏液中粉粒含量最大的一个重要因素,之所以渗漏初期呈现增加的趋势,是因为渗漏初期黏粒的迁出增加了土壤孔隙,为粉粒的迁出提供了通道。

3 结论

本文对裸岩石砾地在不同覆土厚度条件下的水分渗漏和土壤颗粒迁移过程进行了模拟试验,分析了

多孔介质上覆土厚度对于水土运移过程的影响,主要结论为:

(1)较厚的土层具有较好的保水蓄水能力,土层厚度越大,水分渗漏量越小,20 cm 土层 6 h 内的累积水分渗漏量仅为 5 cm 土层的 35.6%;在各土层厚度下,水分渗漏速率均呈先增大后减小,最终趋于稳定的趋势。

(2)土壤颗粒迁出量与土层厚度呈负相关关系,土层厚度越大,土壤颗粒迁出量越小,20 cm 厚度土层的土壤颗粒迁出量仅为 5 cm 厚度土层的 21.8%;土壤颗粒累积迁出量与土层厚度的拟合关系式为: $y=3.19e^{-0.11x}$ ($R^2=0.96$)。

(3)土壤颗粒的迁出量受到水分渗漏的影响较大,水分渗漏前期往往伴随着大量土壤颗粒迁出,随着渗漏过程的进行迁出量逐渐减小;4 个土层厚度渗漏液中的土壤颗粒浓度均随时间逐渐减小,并在 100 min 时趋于稳定。

(4)土壤迁出颗粒中粉粒含量最高,黏粒含量次之,砂粒含量最低;渗漏液中土壤颗粒粒径变化表现为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)随渗漏时间的增加呈先增大后趋于稳定的变化趋势,砂粒(>0.05 mm)呈先减小后趋于稳定的变化趋势。

参考文献:

[1] 王志强,刘宝元,海春兴.土壤厚度对天然草地植被盖度和生物量的影响[J].水土保持学报,2007,21(4):164-167.
[2] 孙永秀,严成,徐海量,等.受损矿区草原群落物种多样性和地上生物量对覆土厚度的响应[J].草业学报,2017,26(1):54-62.
[3] Zhang L, Su F, Yang D, et al. Discharge regime and simulation for the upstream of major rivers over Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(15): 8500-8518.
[4] 陈孝杨,周育智,严家平,等.覆土厚度对煤矸石充填重构土壤活性有机碳分布的影响[J].煤炭学报,2016,41(5):1236-1243.
[5] 吴叔赢,张建丰,高瑞,等.上层土壤厚度对模拟指流水分运动的影响[J].农业工程学报,2011,27(10):169-173.
[6] 张轩,张强,郜春花,等.覆土厚度对煤矸石山复垦土壤水分及大豆生长的影响[J].山西农业科学,2015,43(8):968-971.
[7] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J].地球学报,2014,35(5):535-542.
[8] 陈佳,史志华,李璐,等.小流域土层厚度对土壤水分时空格局的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1565-1570.
[9] 李娟,韩霁昌,张扬,等.不同覆土厚度对裸岩石砾地土壤理化性状和冬小麦产量的影响[J].安徽农业科学,2013,41(12):5312-5314.