

文章编号:1673-9469(2022)01-0052-08

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.008

降雨条件下含有球状微塑料的非饱和黄绵土入渗特性研究

陈亮^{1,2}, 司朋举^{1,2}, 张赏^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点试验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究降雨条件下含有不同含量、不同粒径的球状微塑料黄绵土的非饱和入渗特性, 开发了一套模拟降雨条件下土柱垂直入渗模型试验研究装置, 对含有微塑料的非饱和黄绵土进行了七组降雨入渗试验。结果表明:(1)在降雨强度为20 mm/h、微塑料粒径为5 μm时,微塑料含量为0.05%时促进雨水入渗,其他微塑料含量阻滞雨水入渗,且随着微塑料含量的增加,积水点和饱和点出现的时刻越早。(2)在降雨强度为20 mm/h,微塑料含量为0.25%时,微塑料粒径为3 μm时显著促进雨水入渗,整个试验阶段不产生积水,微塑料粒径为5 μm和8 μm时产生较多积水,阻滞雨水入渗。(3)微塑料的疏水作用显著影响雨水入渗过程,但是其对峰值含水率的影响较微弱,峰值含水率随着微塑料含量的增加而逐渐减小,随着微塑料粒径的增大而逐渐增大。

关键词: 降雨入渗;聚苯乙烯微塑料;入渗率;累积入渗量;浸润峰;体积含水率

中图分类号:TU432

文献标识码:A

Study on the Unsaturated Infiltration Characteristics of Yellow Cotton Soil Containing Spherical Microplastics under Rainfall Conditions

CHEN Liang^{1,2}, SI Pengju^{1,2}, ZHANG Shang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to study the unsaturated infiltration characteristics of yellow cotton soil containing spherical microplastics with different content and different particle size under rainfall conditions, a set of model test equipment for soil column vertical infiltration under simulated rainfall conditions was developed. Seven sets of rainfall infiltration tests were carried out on the yellow cotton soil. The result shows: (1) When the rainfall intensity is 20 mm/h, the microplastic particle size is 5 μm and the microplastic content is 0.05%, rainwater infiltration is promoted, and the content of other microplastics prevents rainwater infiltration, and as the content of microplastics increases, the water point and saturation point appear earlier. (2) When the rainfall intensity is 20 mm/h, the content of microplastics is 0.25% and the particle size of the microplastics is 3 μm, the infiltration of rainwater will be significantly promoted, and no water will be generated during the whole test period. When the particle size of the microplastics is 5 μm and 8 μm, a lot of water will be generated, which will block the infiltration of rainwater. (3) The hydrophobic effect of microplastics significantly affects the process of rainwater infiltration, but its impact on the peak water content is relatively weak. However, its impact on the peak water content is relatively weak, the peak water content gradually decreases with the increase of the microplastic content, and gradually increases with the increase of the microplastic particle size.

Key words: rainfall infiltration; polystyrene microplastics; infiltration rate; cumulative infiltration; infiltration peak; volumetric water content

收稿日期:2021-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778210)

作者简介:陈亮(1976-),男,江苏徐州人,博士,教授,主要从事岩土渗流理论与测试方面的研究。

2004年,微塑料(Microplastics)这一概念被首次提出,主要是指粒径 $<5\text{ mm}$ 的塑料颗粒^[1]。微塑料在生态系统中以初级微塑料(人造微材料)或次级微塑料(由较大的塑料垃圾分解而产生)的形式存在^[2]。研究表明:微塑料具有不同形状,例如纤维状、碎片状和球状颗粒等,其尺寸较小,疏水性强,性质相对稳定,可长期存在于环境中^[3-5]。土壤中微塑料的来源有很多,其中污泥的农用、地膜等塑料覆盖物的残留、有机肥料的长期施用、地表水灌溉渗透及大气沉降这5种方式是微塑料进入土壤环境的主要途径^[4-6],这些做法都会造成土壤中微塑料的积累。

有关研究指出,陆地中存在的微塑料丰度可能是海洋的4~23倍,每年输入耕地土壤中的微塑料远超过向海洋中的输入量,土壤可能是比海洋更大的塑料储藏库^[7]。廖苑辰等^[8]研究发现:10 mg/kg的微塑料对小麦叶片光合作用系统产生了损害,阻碍了蛋白质的合成;同时发现粒径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微球较100 nm的聚苯乙烯微球对小麦的生长表现更大的毒性效应。李贞霞等^[9]的研究结果表明:微塑料会破坏植物叶片类胡萝卜素的合成,损害植物光合作用系统,阻碍蛋白质的合成,严重影响植物的生长。微塑料在土壤-地下水中的迁移能力通常随pH值的升高而增强^[10-11]。微塑料团聚程度通常随pH值的升高而降低,其团聚体平均粒径随之下降,因而更容易通过土壤-地下水介质孔隙运移。此外,土壤-地下水环境pH值的变化,能够引起微塑料及土壤-地下水介质表面官能团电离程度的改变,进而影响微塑料的迁移能力^[12]。近年来,Horton等^[13]总结了土壤环境中微塑料的来源和危害,其中一个主

要威胁是微塑料可能通过食物被人类吸收。

目前关于微塑料的研究较多的集中在对动植物的生长繁殖以及微塑料在土壤中的迁移影响机制上,关于微塑料对土体理化性质、持水保水能力和影响雨水入渗等方面的研究相对较少。于是本文为研究降雨条件下含有不同含量、不同粒径的非饱和球状聚苯乙烯微塑料黄绵土的入渗特性,开发了一套模拟降雨条件下土柱垂直入渗模型试验装置,研究微塑料的存在对土壤雨水入渗的影响,并为受到微塑料污染的干旱、半干旱地区的农田灌溉提供指导和参考。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置的设计

降雨入渗试验仪器的主体部分为一维垂直土柱,采用厚度为5 mm的透明有机玻璃管制造,竖直一维土柱试验仪器高度为29.5 cm,内径为14 cm,外径为15 cm,土柱下端设置有排水口,便于排水。降雨入渗试验装置仪器结构图如图1所示,图中结构图代表了整个降雨入渗试验装置的主要组成部分。

一维垂直土柱上方有降雨装置,由降雨器和蠕动泵组成,可由蠕动泵和降雨器控制雨强大小,蠕动泵可调节进入降雨器的水量,通过旋转开关和泵头来调节每分钟的出水量,从而换算成相应的雨强,降雨器可以用来形成均匀降雨,二者联合共同构成降雨系统。土柱的侧边插入4个土壤水分传感器,从土柱上端到底部依次编号为4#、3#、2#、1#,用以监测土壤的体积含水率随时间的变化。每个水分传感器的间距为5 cm,填土高度为25 cm,土柱上部留有积水存留的空间,在土柱侧边贴上

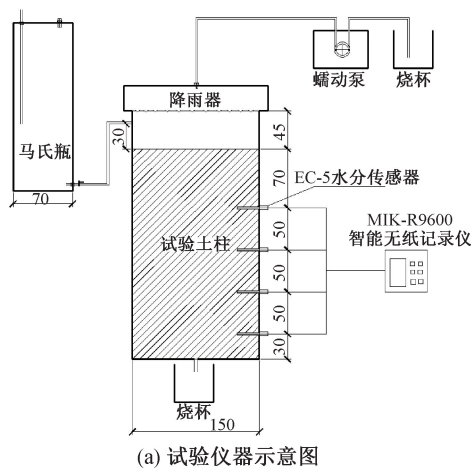


图 1 降雨入渗试验仪器图(单位:mm)

Fig. 1 Rain infiltration test instrument diagram

刻度尺以供读取积水高度,从而可测得水分入渗量及入渗率的大小。试验中通过 50 cm 的钢尺测量湿润峰(沿土柱周边找到湿润峰最大的地方测量),前期每 5 min 测量一次,中期每 10 min 测量一次,后期根据试验周期每 20 min 或者 30 min 测量一次。试验过程中通过马氏瓶控制积水高度,积水高度为 3 cm,用以模拟降雨后期地表径流产生后积水高度不变的状态,使得降雨过程模拟更加完整、真实。试验中 EC-5 传感器和 MIK-R9600 无纸记录仪对实验数据的采集频率为每 1 min 采集一个数据,试验环境温度为 26 ℃~27 ℃,环境温度较稳定。

1.2 EC-5 土壤水分传感器标定

对同一土体,EC-5 传感器的输出信号值与被测土壤的体积含水率之间具有一一对应的映射关系。试验前对所用的 4 支传感器分别编号为 1#、2#、3#、4#,然后配置 5%、10%、15%、20% 体积含水率的试样,将不同编号的土壤水分传感器分别插入到配置好的土样当中,测得土壤水分传感器所显示出的电压值,对不同编号的土壤水分传感器进行标定,得到含水率与输出信号电压值之间的关系。由于本试验中微塑料的含量和粒径各不相同,需要做 7 次标定,这里仅展示微塑料含量为 0.00% 的传感器标定结果,4 支传感器的输出信号值与体积含水率如图 2 所示。

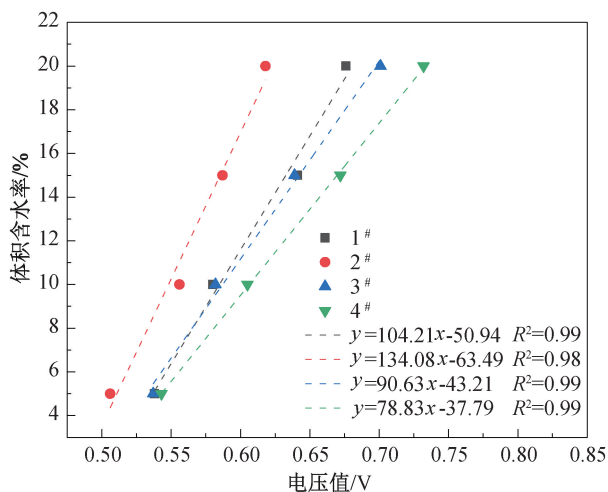


图 2 土壤水分传感器标定曲线

Fig. 2 Calibration curve of soil moisture sensor

由图 2 可知,1#、2#、3#、4# 传感器的输出信号值与体积含水率具有较好的线性关系,即随着含水率的增大,电压值也就越高。通过线性拟合发现, R^2 基本都在 0.95 以上。通过拟合得到的电压

与体积含水率关系曲线,可求出不同电压值所对应的体积含水率。

1.3 试验土样

黄绵土为一种弱发育土壤,以中小孔隙为主,结构性较差,结构体容易被破坏,属于黄土高原典型土壤。本实验所用土样黏粒含量为 5.53%,粉粒含量为 19.32%,砂粒含量为 75.15%。试验开始前用密度浮选法多次湿洗土样,去除土样中已经存在的微塑料,然后将土样烘干,去除土样中的枯枝落叶、植物根茎等侵入物。微塑料选用分选性、稳定性较好的球状聚苯乙烯塑料,微塑料粒径分别为 3、5 和 8 μm 。为研究微塑料含量和粒径对黄绵土雨水入渗过程的影响,本试验共设计 5 组不同微塑料含量,3 组不同微塑料粒径的试验方案,具体的试验方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

Tab. 1 Test plan

组别	微塑料含量/%	微塑料粒径/ μm	降雨强度/ $(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$
1	0.00	5	20
2	0.05	5	20
3	0.10	5	20
4	0.25	5	20
5	0.50	5	20
6	0.25	3	20
7	0.25	8	20

2 试验结果及分析

2.1 微塑料的含量对非饱和土入渗特性的影响

2.1.1 微塑料含量对入渗率的影响

图 3 为微塑料粒径为 5 μm 时,五组不同微塑料含量下一维土柱垂直入渗时的入渗率时程曲线,由图可知不同微塑料含量对土柱的入渗率具有如下特征:

(1) 由入渗率时程曲线可知,试验黄绵土不含微塑料和含有微塑料的最小入渗能力不同,不含微塑料的黄绵土最小入渗能力约为 0.037 mm/min ;微塑料含量为 0.10%、0.25%、0.50% 时,其最小入渗能力约均为 0.013 mm/min ,说明此时的微塑料含量变化范围基本不影响其最小入渗能力;微塑料含量为 0.05% 的黄绵土,由于其促进非饱和土体雨水入渗,在试验过程中产生积水过程较慢,未达到稳定入渗阶段,其入渗率持续下降且波动较大。

(2) 由入渗率时程曲线可知,此时的降雨强度均大于土柱的最小入渗能力,土柱的入渗率时程

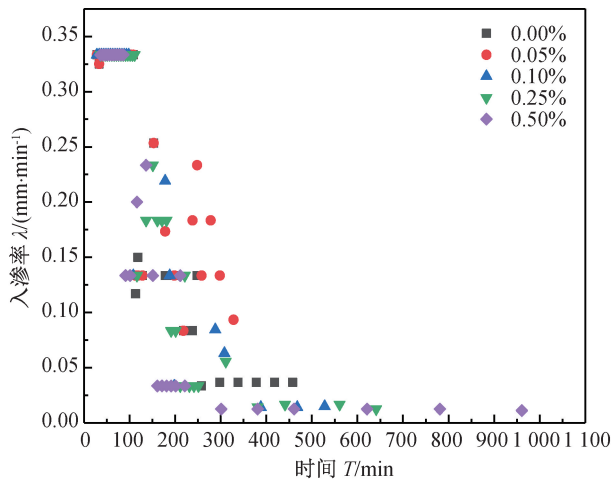


图 3 不同微塑料含量下土柱入渗率时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of soil column infiltration rate under different microplastic content

曲线均呈现三阶段变化的分布规律(微塑料含量为 0.05% 时除外,由于此时的微塑料含量起到促进雨水入渗的效果,未达到稳定入渗阶段,只呈现两阶段分布的变化规律)。第一阶段,土柱的入渗率为一常数,其大小等于降雨强度,土柱表面出现积水(即土柱表面土体进入暂态饱和)的时间就是第一阶段结束(第二阶段开始)的时间;第二阶段,土柱的入渗率随着降雨历时的增加逐渐衰减至稳定值,土柱表面积水高度阶梯变化值稳定(土柱表面的土体由暂态饱和和达到完全饱和)的时间就是第二阶段结束(第三阶段开始)的时间;第三阶段,土柱的入渗率趋于常数。由入渗率时程曲线的三阶段变化规律分析,可将降雨强度大于土壤最小入渗能力的入渗过程分为无压入渗阶段、有压入渗阶段和饱和入渗阶段。

(3) 由入渗率时程曲线可知,不同的微塑料含量下,土柱出现积水点和饱和点的时间不同,如表 2 所示。由表可知,当微塑料含量为 0.05% 时,其积水点出现的时间远远大于其他含量微塑料的土柱,由此可知此含量的微塑料起到促进雨水入渗的作用。当微塑料的含量为 0.00%、0.10%、0.25%、0.50% 时,随着微塑料含量的增加其出现积水点和饱和点的时间越早。如微塑料含量为 0.00% 时,降雨历时达到 150 min 左右才出现积水点,约 305 min 达到饱和点;而当微塑料含量为 0.50% 时,降雨历时 91 min 即出现积水点,220 min 左右达到饱和点。同时微塑料含量越大,积水点至饱和点的时间间隔越短;当降雨强度为 0.00% 时,积水点至饱和点的时间间隔为 155 min,而当微

塑料含量为 0.50% 时,积水点至饱和点的时间间隔只有 129 min。

表 2 积水点和饱和点的时间

Tab. 2 Time of stagnation point and saturation point

微塑料含量/%	积水点 T_1 /min	饱和点 T_2 /min	时间差 $(T_2 - T_1)$ /min
0.00	150	305	155
0.05	192	—	—
0.10	140	290	150
0.25	136	280	144
0.50	91	220	129

(4) 由以上分析可知,微塑料含量为 0.05% 时会促进非饱和黄绵土的雨水入渗,微塑料含量为 0.10%、0.25% 和 0.50% 时会阻碍非饱和黄绵土雨水入渗,这是由于聚苯乙烯微塑料是一种疏水性很强的微塑料^[3-5],在土壤中添加这种微塑料,一方面起到黏粒阻水的作用,一方面起到微塑料本身特性疏水的作用。两个作用相互矛盾,并且随着微塑料含量的增加,疏水作用逐渐降低,阻水作用逐渐加强。当微塑料含量较低时(含量为 0.05%),疏水作用大于阻水作用,起到促进雨水入渗的作用,当微塑料含量较高时(微塑料含量为 0.10%、0.25%、0.50%),疏水作用小于阻水作用,起到阻碍雨水入渗的作用。

不同微塑料含量下土柱的累积入渗量随降雨历时的时程曲线如图 4 所示。

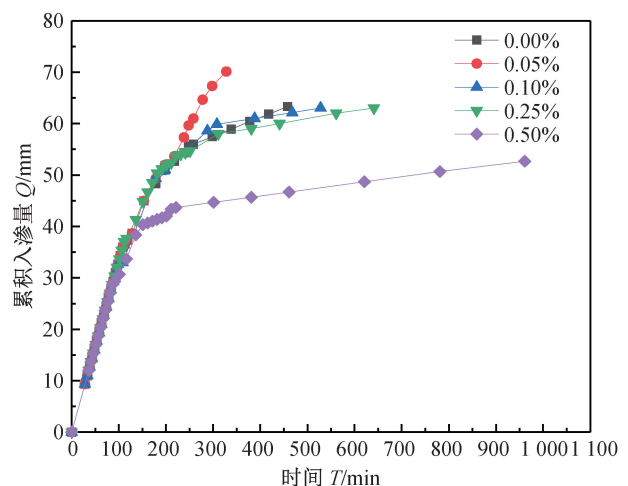


图 4 不同微塑料含量下土柱的累积入渗量时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of cumulative infiltration volume of soil column with different microplastic content

由图 4 分析可知:

当微塑料含量为 0.05% 时曲线呈现两阶段变化规律,当微塑料含量为 0.00%、0.10%、0.25%、0.50% 时,曲线呈现三阶段变化。五种微塑料含量

的累积入渗量时程曲线在第一阶段曲线基本重合,其斜率等于降雨强度;第二阶段,曲线逐渐变得平缓,曲线开始出现差异,其中微塑料含量为0.05%和0.50%的累积入渗量时程曲线与其他三条曲线差异较大,微塑料含量为0.00%、0.10%和0.25%的三条累积入渗量时程曲线差异不大。第三阶段的累积入渗量时程曲线为一条直线,其斜率等于土体稳定入渗的渗透系数。

微塑料含量为0.05%时累积入渗量最大,当微塑料含量为0.00%、0.10%、0.25%、0.50%时,累积入渗量随着微塑料含量的增加逐渐减小,且均小于微塑料含量为0.05%时的累积入渗量。

从图4可知,微塑料含量为0.05%时,雨水入渗到底部所需要的时间最短,说明此时的微塑料含量起到促进雨水入渗的效果,微塑料含量为0.10%、0.25%、0.50%时,随着微塑料含量的增加,其雨水入渗到土柱底部所需的时间逐渐增加,说明此时的微塑料含量起到阻滞雨水入渗的效果。

2.1.2 监测点含水率分析

图5为微塑料粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 时,不同微塑料含量下土壤水分传感器监测的体积含水率时程曲线,由图可知,不同微塑料含量下各监测点体积含水率时程曲线具有如下特征:

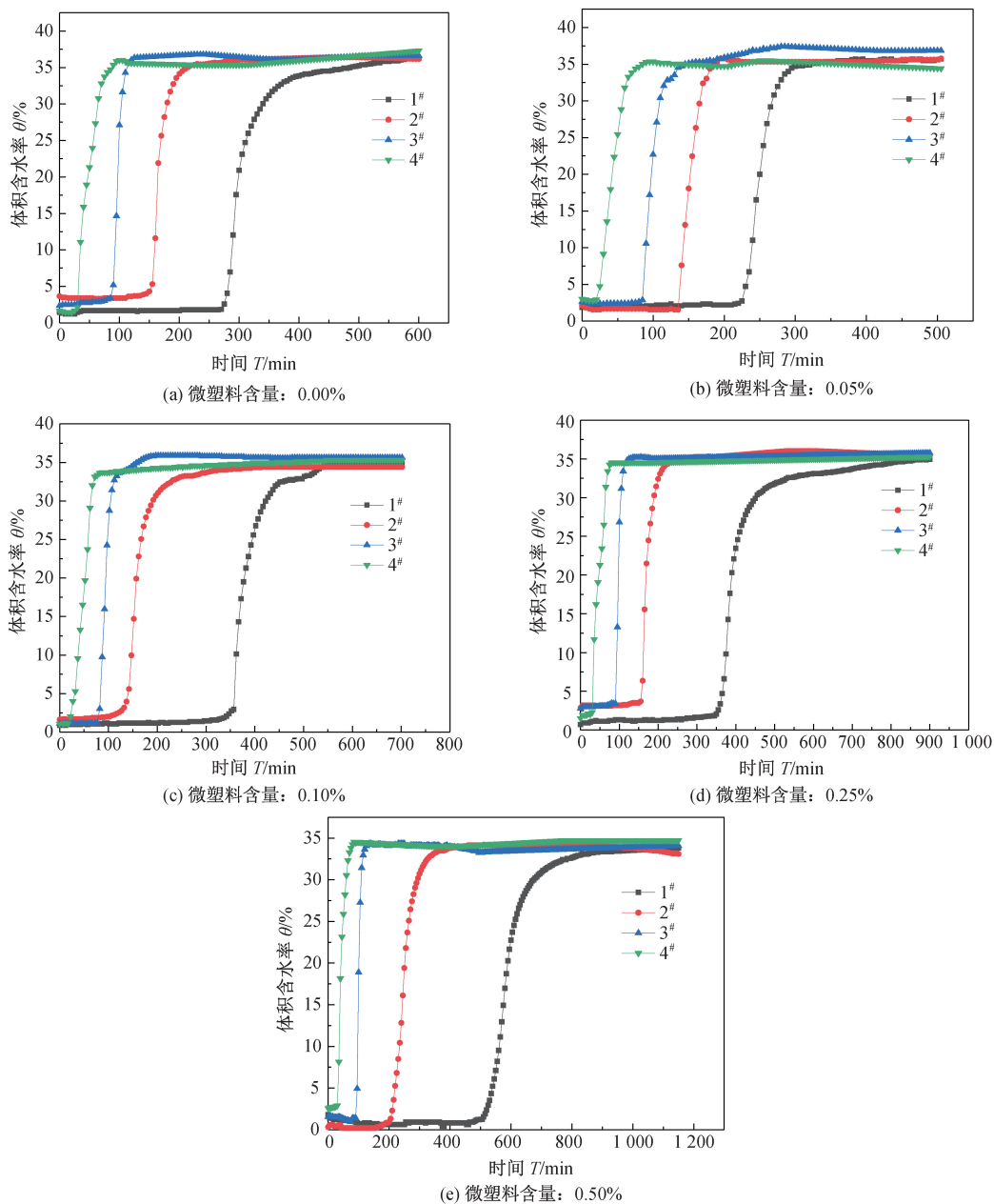


图5 不同微塑料含量下监测点体积含水率时程曲线

Fig. 5 Time history curve of volumetric water content of monitoring points under different microplastic content

(1) 从不同微塑料含量下传感器检测的土体体积含水率可知,不同微塑料含量下的土体峰值含水率存在差异,当微塑料含量分别为 0.00%、0.05%、0.10%、0.25%、0.50%时,土体的峰值含水率分别为 36%、35.8%、35.5%、35%、34%,说明随着土体微塑料含量的增加,其峰值含水率逐渐减小。虽然微塑料含量为 0.05%时起到促进雨水入渗的效果,但是对于土体含水率来说,土体中加入微塑料,就增加了土体中的细小颗粒,土体变得密实,所以土体体积含水率随着微塑料含量的增加逐渐减小(微塑料的疏水作用对体积含水率的影响较微弱)。

(2) 在同一降雨强度下,不同微塑料含量下,水分传到 1# 和 2# 传感器的时间差异不大,从 3# 传感器开始,水分传到传感器的时间开始出现差异,其中,微塑料含量为 0.05%时传到 3# 和 4# 传感器的时间最短,当微塑料含量为 0.00%、0.10%、0.25%、0.50%时,随着微塑料含量的增加,水分传到 3# 和 4# 传感器的时间逐渐增加,说明微塑料含量为 0.05%时起到促进雨水入渗的效果,雨水入渗到 2# 和 3# 传感器之间时,土体表面开始逐渐产生积水雨水,入渗逐渐从第一阶段过渡到第二阶段。

2.2 微塑料的粒径对非饱和土入渗特性的影响

2.2.1 微塑料粒径对入渗率的影响

图 6 为微塑料含量为 0.25%时,不同微塑料粒径下一维土柱垂直入渗时的入渗率时程曲线,由图可知:

(1) 微塑料粒径为 3 μm 时,入渗率时程曲线

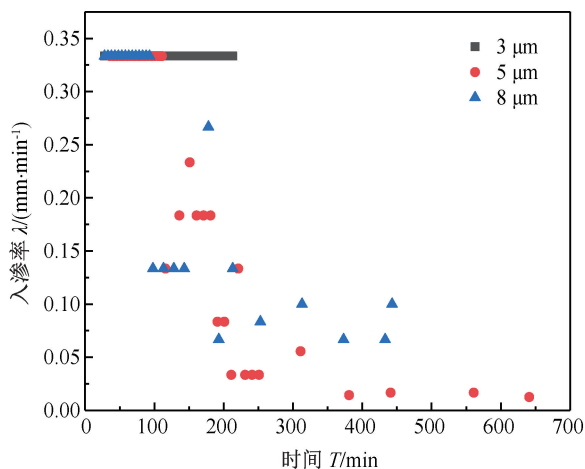


图 6 不同微塑料粒径下土柱入渗率时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of soil column infiltration rate under different microplastic particle size

为一条直线,入渗率保持不变,等于降雨强度 0.033 42 mm/min,土体表面未出现积水,此时相对于粒径 3 μm 的微塑料来说 0.25% 的微塑料含量起到疏水作用,加快雨水入渗。微塑料粒径为 5 μm 时,最小入渗率为 0.013 mm/min;微塑料粒径为 8 μm 时,最小入渗率为 0.067 mm/min。粒径 8 μm 的比粒径 5 μm 的土柱最小入渗率大,这是由于相同质量百分比下,两种粒径的微塑料在这两种含量下均起到阻水作用,粒径 8 μm 的微塑料颗粒比粒径 5 μm 的微塑料颗粒少,土体较松散,所以饱和入渗率较大

(2) 通过上文分析可知,粒径为 5 μm 时,微塑料促进雨水入渗的含量范围为 0.05%~0.10%,土柱表面产生少量积水,阻滞雨水入渗的含量范围为 0.25%~0.50%,土柱表面出现大量积水。同时通过补充实验(补充实验:微塑料粒径为 3 μm ,含量为 0.05%、0.10%、0.25%、0.50%,其他条件同本实验),研究发现:粒径为 3 μm 时,微塑料促进雨水入渗的含量范围为 0.05%~0.25%,土柱表面不产生积水,阻滞雨水入渗的含量为 0.50%,土柱表面出现较多积水。结果表明:随着微塑料粒径的减小,起到疏水作用的微塑料含量增加,范围增大,且疏水效果明显增强。

2.2.2 微塑料含量对浸润峰的影响

图 7 为微塑料含量为 0.25%时,不同微塑料粒径下浸润峰深度时程曲线。由图可知,不同微塑料粒径下土柱的浸润峰深度随时间历时的增加具有如下的变化规律:

(1) 微塑料粒径为 3 μm 时,浸润峰深度时程

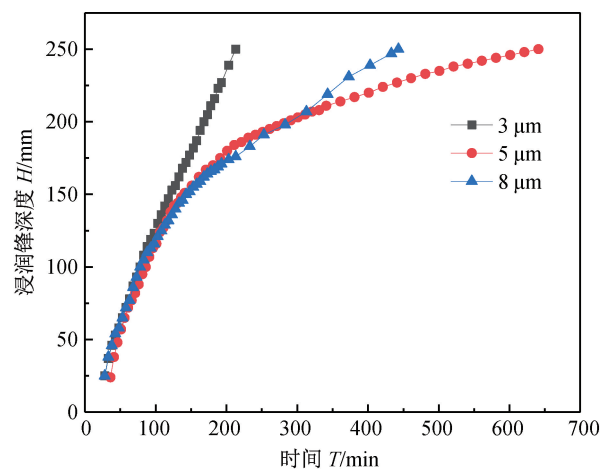


图 7 不同微塑料粒径下浸润峰深度时程曲线

Fig. 7 Time history curve of infiltration peak depth under different microplastic particle size

曲线为一条直线,且到达土柱底部所需的时间远小于粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 的土柱,说明对于 $3\ \mu\text{m}$ 的微塑料来说,微塑料含量为 0.25% 时促进雨水入渗。

(2)微塑料粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 时土柱浸润峰深度时程曲线呈现三段式分布规律。第一阶段,降雨初期,土柱的基质吸力较大,降落到土柱表面的雨水迅速传至土柱内,因此,该阶段土柱的浸润峰深度随时间增长较快;第二阶段,降雨持续一段时间后,土柱表面的土壤含水率增加,达到暂态饱和状态后,土柱的入渗能力慢慢衰减,浸润锋的增长速度随时间逐渐减小。第三阶段,降雨后期,当土柱表面的土体达到饱和状态后,土柱按照饱和入渗的规律均匀地向土柱内部入渗。

(3)从图7可以看出,微塑料粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 的土柱浸润峰深度时程曲线第一阶段和第二阶段的曲线基本重合,第三阶段开始出现明显

差异,说明对于粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ 的微塑料严重影响降雨入渗的饱和入渗阶段。

2.2.3 监测点含水率分析

图8为微塑料含量为 0.25% 时,不同微塑料粒径下土壤水分传感器检测的体积含水率时程曲线。从不同微塑料粒径下传感器检测的土体体积含水率可知,不同微塑料粒径下的土体峰值含水率存在差异,当微塑料粒径分别为 3 、 5 、 $8\ \mu\text{m}$ 时,土体的峰值含水率分别为 34% 、 35% 、 36% ,说明随着土体微塑料粒径的增加,其峰值含水率逐渐增大。虽然微塑料粒径为 $3\ \mu\text{m}$ 时起到促进雨水入渗的效果,但是对于土体含水率来说,土体中加入微塑料,颗粒细小的微塑料填充在土颗粒的孔隙中,使得土体密实(微塑料的疏水作用对体积含水率的影响较弱),同时由于加入的是同等质量百分比的微塑料,粒径越小,微塑料颗粒越多,所以土体体积含水率随着粒径增大而增大。

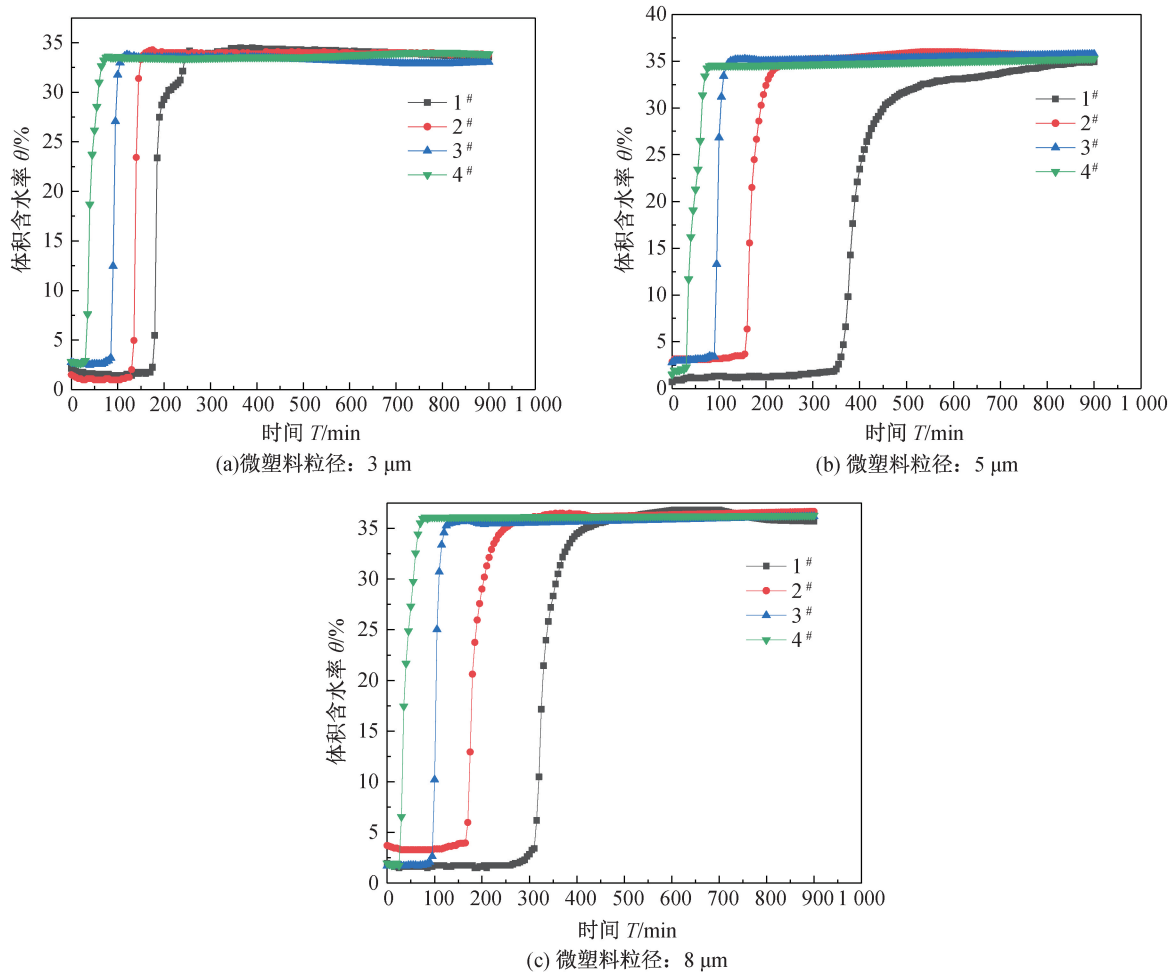


图8 不同微塑料粒径下监测点体积含水率时程曲线

Fig. 8 Time history curve of volumetric water content of monitoring points under different microplastic particle size

3 结论

为研究微塑料的存在对非饱和土壤雨水入渗的影响,本试验通过自行设计加工的试验装置对含有不同含量、不同粒径微塑料的黄绵土进行入渗试验研究,得到如下结论:

1)当降雨强度大于土体的最小入渗能力时,垂直土柱的入渗率时程曲线呈现三阶段式变化规律,即无压入渗、有压入渗和饱和入渗。

2)微塑料含量对垂直土柱的入渗影响较大,在降雨强度为 20 mm/h、微塑料粒径为 5 μm 时,微塑料含量为 0.05% 时促进雨水入渗,微塑料含量为 0.00%、0.10%、0.25%、0.50% 时阻滞雨水入渗,且随着微塑料含量的增加,积水点和饱和点出现的时刻越早。

3)微塑料粒径对垂直土柱的入渗影响较大,在降雨强度为 20 mm/h,微塑料含量为 0.25% 时,微塑料粒径为 3 μm 时显著促进雨水入渗,且整个试验阶段不产生积水,微塑料粒径为 5 μm 和 8 μm 时阻滞雨水入渗。

4)微塑料的疏水特性显著影响雨水入渗过程,但是其对峰值含水率的影响较微弱,峰值含水率随着微塑料含量的增加而逐渐减小,随着微塑料粒径的增大而逐渐增大。

参考文献:

- [1] WRIGHT S L, KELLY F J. Plastic and Human Health: a Micro issue? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (12): 6634-6647.
- [2] ZHAO J M, RAN W, TENG J, et al. Microplastic Pollution in Sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640 / 641: 637-645.
- [3] 朱永官, 朱冬, 许通, 等. (微)塑料污染对土壤生态系统的影响: 进展与思考 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(01): 1-6.
- [4] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1021-1030.
- [5] 范玉梅, 石佳颖, 高李璟. 土壤中微塑料的来源及检测 [J]. *化工时刊*, 2019, 33(06): 28-31.
- [6] LI X, CHEN L, MEI Q, et al. Microplastics in Sewage Sludge from the Wastewater Treatment Plants in China [J]. *Water Research*, 2018, 142: 75-85.
- [7] NIZZETTO L, FUTTER M, LANGAAS S. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (20): 10777-10779.
- [8] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 361-367.
- [9] 李贞霞, 李庆飞, 李瑞静, 等. 黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39 (05): 47-55.
- [10] SADRI B, PERNITSKY D, SADRZADEH M. Aggregation and Deposition of Colloidal Particles: Effect of Surface Properties of Collector Beads [J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 530: 46-52.
- [11] TONG Meiping, JOHNSON W P. Excess Colloid Retention in Porous Media as a Function of Colloid Size, Fluid Velocity, and Grain Angularity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(24): 7725-7731.
- [12] WANG Mei, GAO Bin, TANG Deshan. Review of Key Factors Controlling Engineered Nanoparticle Transport in Porous Media [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 318: 233-246.
- [13] HORTON A A, WALTON A, SPURGEON D J, et al. Microplastics in Freshwater and Terrestrial Environments: Evaluating the Current Understanding to Identify the Knowledge Gaps and Future Research Priorities [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 127-141.

(责任编辑 王利君)