

文章编号:1673-9469(2022)04-0033-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.005

间歇降雨条件下聚苯乙烯微球对黄绵土入渗特性影响研究

陈亮^{1,2,3},滕健^{1,2*},司朋举^{1,2},颜书法^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2. 河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098;3. 西藏农牧学院 水利土木学院,西藏自治区 林芝市 860000)

摘要: 为研究间歇降雨条件下不同聚苯乙烯塑料微球含量、不同降雨间歇比对黄绵土非饱和入渗影响,利用室内一维土柱模型开展垂直入渗试验研究。结果表明:在间歇降雨循环条件下,土体的湿润锋速度随着间歇降雨循环的增加而逐步衰减,湿润锋速度衰减曲线符合 logistic 模型,并且具有较好的拟合优度;在间歇降雨条件下,低含量的聚苯乙烯微球会使得土体对降雨响应更加敏感,减小对降雨响应的滞后时间,并且增大土体湿润锋深度,减弱土体持水能力,而高含量的聚苯乙烯微球会增大土体对降雨响应滞后时间,并且减小湿润锋深度,增强土体持水能力;在降雨时间与间歇时间比 2:1 的条件下,与降雨时间与间歇时间比 1:1 试验组相比,表现出短历时下湿润锋深度增大,而长历时下湿润锋深度减小;在降雨时间与间歇时间比 1:2 条件下,与降雨时间与间歇时间比 1:1 试验组相比,土体对降雨有着更明显的响应,但在相同历时内其湿润锋深度减小。

关键词: 微塑料;间歇降雨;黄绵土;湿润锋;降雨响应

中图分类号:TU411

文献标识码:A

Influence of Polystyrene Microspheres on Infiltration Characteristics of Loess Soil Under Intermittent Rainfall

CHEN Liang^{1,2,3}, TENG Jian^{1,2*}, SI Pengju^{1,2}, YAN Shufa^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Region Linzhi, Tibet Autonomous 860000, China)

Abstract: In order to study the effects of different polystyrene plastic microsphere contents and different rainfall intermittent ratios on unsaturated infiltration of loess soil under intermittent rainfall conditions, an indoor one-dimensional soil column model was used to conduct vertical infiltration experiments. The results show that: Under the condition of intermittent rainfall cycle, the wetting front velocity of soil gradually attenuates with the increase of intermittent rainfall cycle, the wetting front velocity decay curve conforms to the logistic model, and has a good goodness of fit; Under intermittent rainfall conditions, low content of polystyrene microspheres will make the soil more sensitive to rainfall, reduce the lag time of the response to rainfall, increase the depth of the soil wetting front, and weaken the water holding capacity of the soil, while high content of polystyrene microspheres can increase the lag time of soil response to rainfall, reduce the depth of wetting front, and enhance soil water holding capacity; Compared with the 1:1 experimental group, the wetting front depth increases under short duration, while the wetting front depth decreases under long duration. Compared with the 1:1 experimental group, the soil had a more obvious response to rainfall, but the depth of the wetting front decreased within the same duration.

收稿日期:2022-06-05

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1510802)

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。

* 通讯作者:滕健(1998-),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事岩土渗流研究。

Key words: microplastics; intermittent rainfall; loess soil; wetting front; rainfall response

微塑料(Microplastics)这一概念于2004年首次提出,指颗粒粒径小于5 mm的塑料颗粒^[1]。微塑料在自然环境中按来源分为初生微塑料和次生微塑料,按化学成分分为聚乙烯(Polyethylene, PE)、聚氯乙烯(Polyvinyl chloride, PVC)、聚丙烯(Polypropylene, PP)、聚苯乙烯(Polystyrene, PS)和聚酰胺(Polyamide, PA)等^[1]。初生微塑料指生产中被制成的微米级颗粒,常用于工业制造、护理产品^[2-4];次生微塑料一般由塑料垃圾降解产生^[5-6]。目前研究表明土壤等地下环境是微塑料的重要储存库^[5]。相关研究指出陆地中微塑料丰度可能是海洋中的4~23倍^[7]。大量的微塑料存在于土壤中,将会对土壤的理化性质、持水能力等产生影响。

De Souza Machado等^[8]研究发现常见微塑料显著降低了砂土的土壤容重,改变土壤结构和水分动态,并且聚酯纤维对土壤理化性质的影响最为明显,随着聚酯纤维含量的增加,土壤持水量也相应增加;Jiang等^[9]研究发现碎片状微塑料会影响土壤水流流动模式,使得土体水流流动特征复杂度增加,土的物理参数也出现较大的随机变化;Zhang等^[10]研究表明,微塑料对土壤孔隙度有直接影响,如聚酯微纤维显著降低了土壤孔隙度<30 μm的孔隙体积,而增加>30 μm的孔隙体积,由于持水能力与小孔隙体积呈正相关,因此,超细聚酯纤维的进入降低了土壤的持水能力;De Souza Machado A A等^[11]在对来自北京的壤质砂土中添

加不同种类的微塑料,均明显增加了土壤的蒸发量,植物与微塑料相互作用下,蒸发量提高更加明显;Horton等^[12]研究发现微塑料有较强的疏水性,可以改变土壤的理化性质。

目前有关微塑料对土壤理化性质、持水能力和入渗等方面研究较少。黄土高原是我国水土流失最严重的地区,该地区的主要土壤为黄绵土,其质地较轻,疏松软绵,保水和保肥能力差^[13]。同时作为农耕地区,每年有大量的微塑料经由生产进入土壤。目前现有研究多集中在连续均匀降雨条件下的水分入渗,而现实中降雨及灌溉多为间歇性的。因此本研究采用室内土柱模拟降雨入渗试验,分析间歇降雨条件下,不同聚苯乙烯塑料微球含量(质量分数)、降雨间歇时间比对黄绵土非饱和入渗影响。

1 试验装置及方案

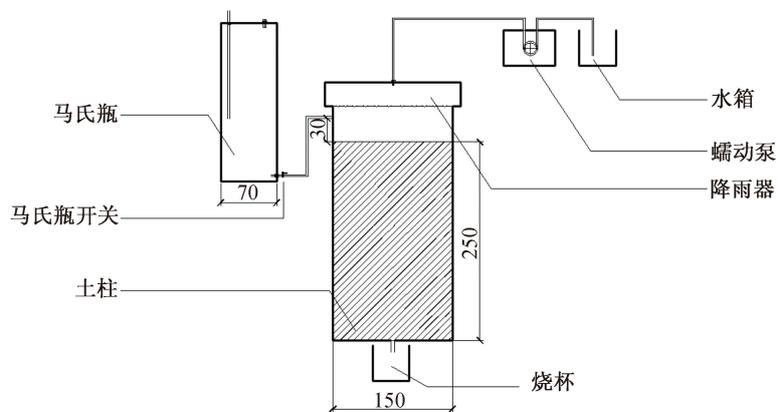
1.1 试验装置

试验装置主体为厚度5 mm透明有机玻璃制成的一维垂直土柱,一维土柱试验仪器高29.5 cm,外径15 cm,内径14 cm,在土柱末端设置排水口。土柱侧边贴有防水刻度,0刻度为土柱内底面,土柱内填土至25 cm刻度处。降雨入渗试验装置如图1所示。

降雨装置位于一维土柱的上方,由降雨器与蠕动泵构成,通过控制蠕动泵实现雨强调节与降雨间歇控制。水由蠕动泵泵入降雨器,来实现均



(a) 试验仪器实物图



(b) 试验仪器结构图

图1 降雨入渗试验装置示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of rainfall infiltration test device

匀降雨,二者联合组成降雨装置。土柱上部留有积水留存空间,积水高度可以通过土柱侧边刻度尺量得。试验过程中通过马氏瓶控制积水高度上限为 30 mm,用来模拟降雨后期地表径流,积水高度不变,使得降雨过程模拟更加接近真实情况。

1.2 试验土样

试验采来自陕西北部黄绵土,试验土样采用静水沉降法进行颗粒分析,根据国际土壤粒级分级标准与国际制土壤质地分类,试验土壤基本性质如表 1 所示。

表 1 试验土样质地与颗粒组成

Tab. 1 The texture and particle composition of the experimental soil samples

土壤类型	土壤质地	各粒级含量/%			
		粘粒	粉砂粒	细砂粒	粗砂粒
黄绵土	粉质壤土	5.53	19.32	71.97	3.18

将土样烘干碾散,过 5 mm 筛,去除其中枯枝、根茎等侵入物。试验前对土样采用密度分离法除杂,以去除土样中可能存在的微塑料。试验土样实物如图 2 所示。



图 2 试验土样实物图

Fig. 2 Physical map of test soil sample

土柱采用控制干密度的方法填筑,将微塑料与土充分拌匀后,分层填入土柱,填筑后干密度为 1.57 g/cm^3 。

1.3 试验微塑料

微塑料的形状和成分有多种,考虑到试验条件和时间,采用聚苯乙烯微球作为试验微塑料。试验微塑料采用科迈新材料有限公司生产的聚苯乙烯(PS)微球,微球的粒径偏差 $<10\%$ 。试验用聚苯乙烯塑料微球实物如图 3 所示。

聚苯乙烯微球具体规格信息见表 2。



图 3 聚苯乙烯塑料微球实物图

Fig. 3 Physical map of polystyrene plastic microspheres

表 2 聚苯乙烯微球产品规格

Tab. 2 Polystyrene microspheres product specifications

成分	粒径/ μm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	分解温度/ $^{\circ}\text{C}$	外观
聚苯乙烯	5	1.06	> 380	白色

1.4 试验方案设计

为了研究降雨间歇时间比、聚苯乙烯微塑料含量对黄绵土降雨入渗过程的影响,共设计 7 组试验,试验中通过控制降雨强度来模拟间歇降雨过程中的降雨启动与停歇。

短历时、高强度的暴雨是黄土地区的主要降雨特征^[14]。设置 3 组为不同降雨间歇时间比 1:1、2:1、1:2 来模拟不同降雨雨情及农田灌溉条件。1:1 间歇降雨中降雨期 30 min,停歇期 30 min,循环继续。2:1 间歇降雨中降雨期 60 min,停歇期 30 min,循环继续。1:2 间歇降雨中降雨期 30 min,停歇期 60 min,循环继续。

目前已有研究表明,不同利用方式下的土地微塑料含量差异大,最高丰度可达 $90\,000 \text{ n/kg}$ ^[15]。考虑当前微塑料污染没有有效的手段处理,并且塑料污染不断进入环境中,势必导致微塑料污染累加。按照设置 5 组不同聚苯乙烯微球含量(质量分数)来模拟土壤受到不同程度微塑料污染情况,具体试验方案如表 3 所示。

表 3 试验方案

Tab. 3 Test plan

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

2 间歇降雨条件下含有微塑料黄绵土入渗试验结果及分析

试验过程中每隔 5 min 读取一次湿润锋在试验装置侧壁刻度尺上的读数,记录得到土体入渗湿润锋深度随时间的变化,湿润锋深度对时间求平均导数分析得到湿润锋速度等水分运移特征数据,来分析间歇降雨条件下含有微塑料黄绵土

入渗特征。

2.1 聚苯乙烯塑料微球含量对间歇降雨条件下黄绵土水分运移的影响

2.1.1 聚苯乙烯微球含量对黄绵土湿润锋速度影响

图 4 为间歇降雨条件下不同聚苯乙烯微球含量土柱入渗湿润锋速度随时间变化散点图,在试

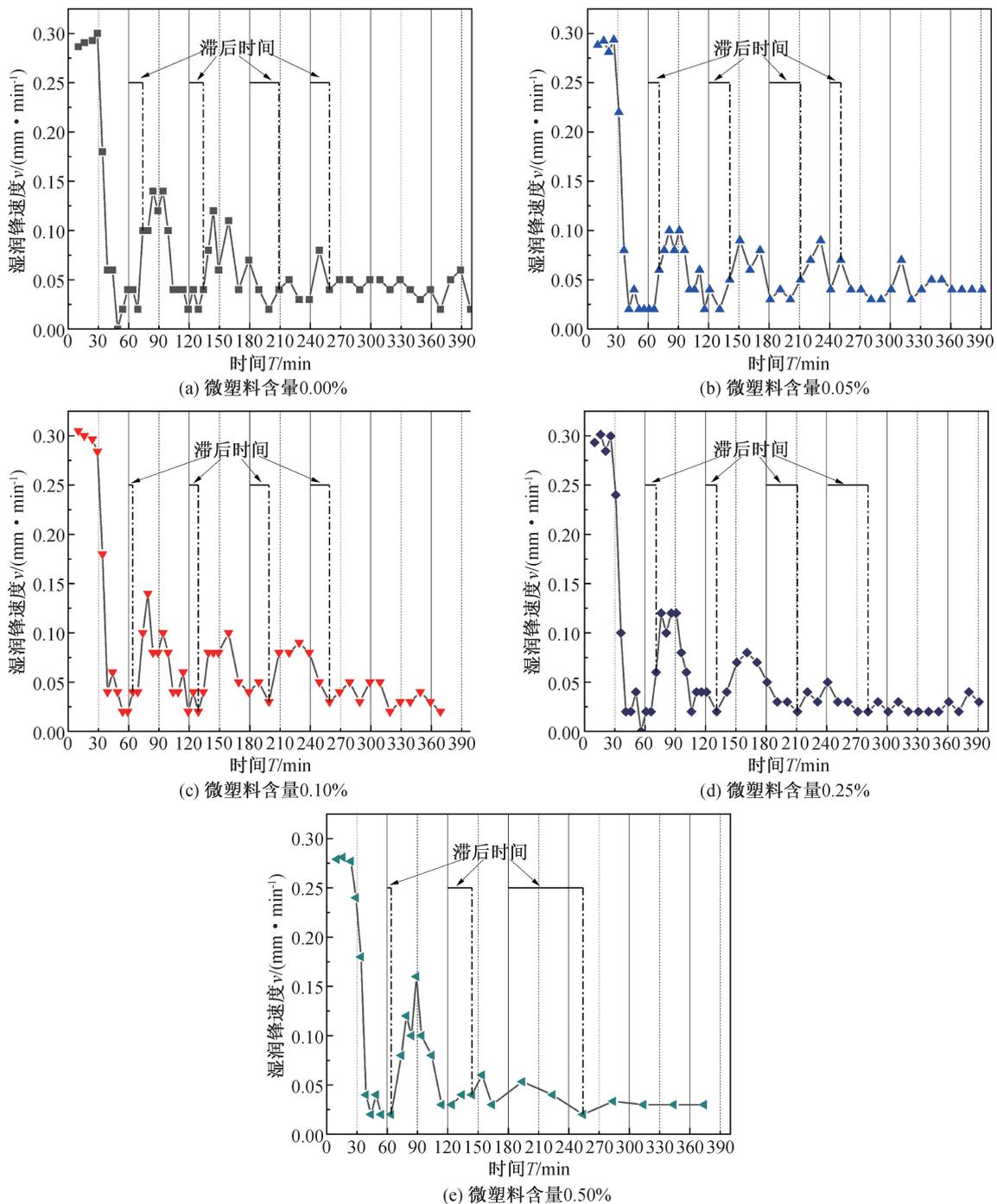


图 4 间歇降雨条件下不同聚苯乙烯微球含量土柱入渗湿润锋速度随时间变化散点图

Fig. 4 Scatter plots of time-dependent changes in wet front velocity of soil column infiltration with different polystyrene microsphere contents under intermittent rainfall

验进行 400 min 后,各组试验的湿润锋速度均达到一稳定值,因此图像仅绘制前 400 min 来分析。根据图可以分析可知,当降雨强度、降雨与间歇时间比相同下,不同聚苯乙烯微球含量对土柱入渗影响特征:

(1)在降雨间歇时间比 1:1 循环下,5 种聚苯乙烯微球含量的土体湿润锋速度随着间歇降雨循环而逐步衰减。

(2)在降雨间歇再降雨循环中,土体水分经历一个再分布的过程,而这个过程需要一定的时间,也就是说对降雨响应存在时间上的滞后,湿润锋运动存在滞后效应,因此定义降雨启动时刻到湿润锋速度开始上升时刻为降雨响应滞后时间。在降雨与间歇时间比 1:1 循环下,5 种聚苯乙烯微球含量的土体对降雨响应有显著不同。取前 5 个降雨间歇循环进行分析得到表 4,其中微塑料含量为 0.50% 试验组在三个降雨间歇循环后湿润锋速度衰减为一稳定值,后期没有表现出对降雨启动的响应,因此仅取其前三个降雨间歇循环。

表 4 不同聚苯乙烯微球含量土体降雨响应平均滞后时间
Tab. 4 Average lag time of rainfall response of soil with different content of polystyrene microspheres

聚苯乙烯微球含量/%	降雨响应平均滞后时间/min
0.00	17.75
0.05	18.50
0.10	12.75
0.25	23.50
0.50	34.00

当聚苯乙烯微球含量为 0.10% 时,由于塑料微球对水分迁移速度起到增大作用,使得水分再分布过程用时减小,减小了降雨响应的滞后时间;对于聚苯乙烯微球含量为 0.25% 和 0.50% 的土体,其阻滞作用降低了水分迁移速度,从而使得再分布过程时间增加;而 0.05% 含量的土体对降雨响应的滞后时间与 0.00% 相差不大。

表 5 不同微塑料含量土体表面积水时间

Tab. 5 The time that water accumulating on the surface of the soil with different microplastic contents

聚苯乙烯微球含量/%	首次积水时间 T/min
0.00	134
0.05	131
0.10	209
0.25	81
0.50	78

表 5 为降雨间歇时间比 1:1 条件下不同聚苯乙烯微球含量土体表面积水时间,可以分析得出:

(1)随着土体中聚苯乙烯微球含量的增加,积水发生时间呈现出先增大后减小的现象。聚苯乙烯微球含量 0.10% 可以显著促进降雨入渗,延长积水发生时间,这是因为聚苯乙烯微球有着良好的疏水性,而低含量聚苯乙烯微球对土壤孔隙影响较小,此时塑料微球疏水作用占据主导作用。导致积水时间较含量 0.00% 的积水时间滞后 55.97%。

(2)聚苯乙烯微球含量为 0.05% 的土体积水出现时间与无聚苯乙烯微球的土体相差不大;聚苯乙烯微球含量为 0.25%、0.50% 时,出现明显抑制降雨入渗,积水发生时间相对 0.00% 含量的土柱分别提前了 39.55%、41.79%,这是由于土体较多孔隙被聚苯乙烯微球所占据,阻滞了水分入渗,此时塑料微球的疏水作用影响相对较小。

(3)聚苯乙烯塑料微球自身具有良好的疏水性,可以促进水分的运移。塑料微球掺入土壤后,由于粒径微小,会占据土壤孔隙,阻滞水分的运移。疏水性与对土壤孔隙结构影响呈现竞争关系,含量不同,聚苯乙烯塑料微球对土壤水分运移影响整体表现不同。

2.1.2 聚苯乙烯微球含量对湿润锋深度的影响

图 5 为间歇降雨条件下不同聚苯乙烯微球含量土体累计入渗深度随时间变化曲线,根据图分析可得出以下影响特征:

(1)微塑料含量为 0.00%、0.05% 和 0.10% 时,湿润锋整体呈现两阶段变化。第一阶段是持续降雨第一周期(即试验前 30 min),湿润锋深度散点图表现为一条倾斜的直线,这个阶段,土体含水率较低,土体的基质吸力较大,雨水到达土体表面后被迅速吸收,不断地传至土体内部。第二阶段从降雨间歇第一个周期开始直到试验结束,湿润锋深度曲线表现为一条波动上升的曲线,体现了湿润锋对降雨条件变化的响应。降雨持续时,湿润锋上升较快,降雨间歇时,湿润锋上升较缓,而降雨历时超过 240 min 以后表现为一条微微上凸的曲线,此时降雨条件的变化对湿润锋深度的影响较小。微塑料含量为 0.25% 和 0.50% 时,湿润锋时程曲线呈现为三阶段变化,前两阶段如上所述,第三阶段,从土柱表面土体达到饱和状态之后,水分以均匀速度向土柱内部入渗。

(2)在间歇降雨条件下,含有不同微塑料含量黄绵土的湿润锋深度时程曲线在前期 5 条曲线差

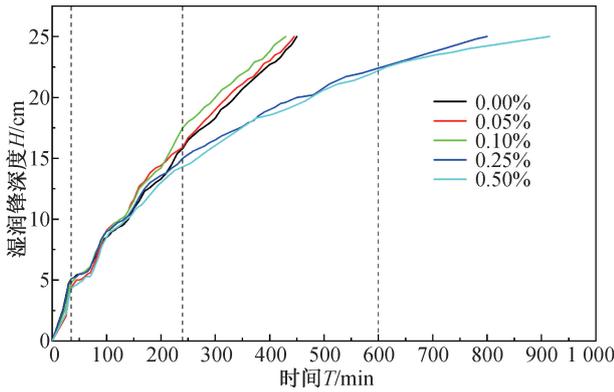


图5 间歇降雨条件下不同聚苯乙烯微球含量土体湿润锋深度随时间变化曲线

Fig.5 Variation curve of wetting front depth of soil with different polystyrene microsphere content under intermittent rainfall

异不大。在3个降雨间歇循环以后,历时相同的其入渗深度不同。0.00%、0.05%和0.10%微塑料含量入渗深度明显大于0.25%和0.50%,并且0.10%含量入渗深度最大,其次是微塑料含量为

0.05%的土体,入渗深度均大于微塑料含量为0.00%的土体。在经历相同降雨间歇循环下,微塑料含量0.10%显著促进雨水入渗,降低了土体的持水能力,增大了其入渗深度,0.05%含量对土体入渗深度影响较小,但是也起到促进作用;0.25%与0.50%含量减小了入渗深度,阻滞了黄绵土的雨水入渗,增强了土体的持水能力。

2.2 不同降雨间歇时间比对黄绵土水分运移的影响

2.2.1 不同降雨间歇比对黄绵土湿润锋速度的影响

图6为不同降雨间歇时间比下土柱湿润锋速度随时间变化散点图,根据图可以分析得出以下不同降雨间歇时间比对土柱入渗影响特征:

(1)湿润锋速度随着间歇降雨过程逐步衰减,在试验前400 min湿润锋速度绘制湿润锋速度随时间变化图中,选取湿润锋速度峰值进行不同降

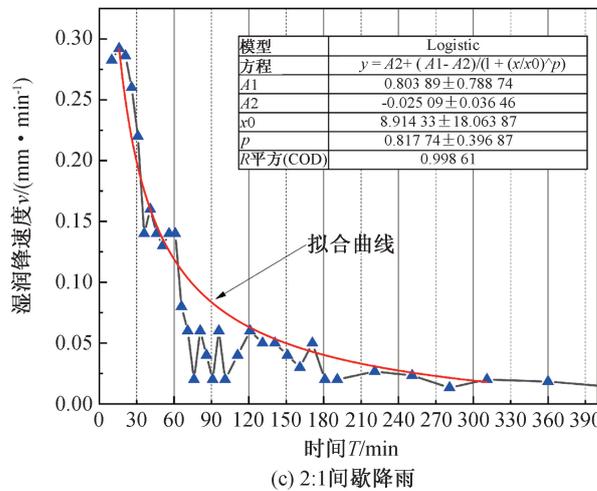
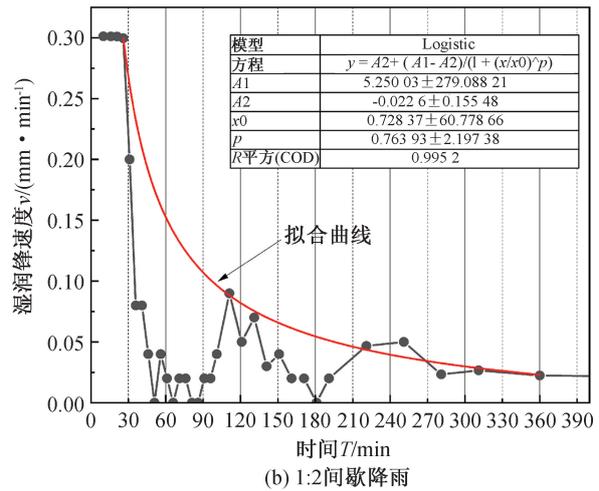
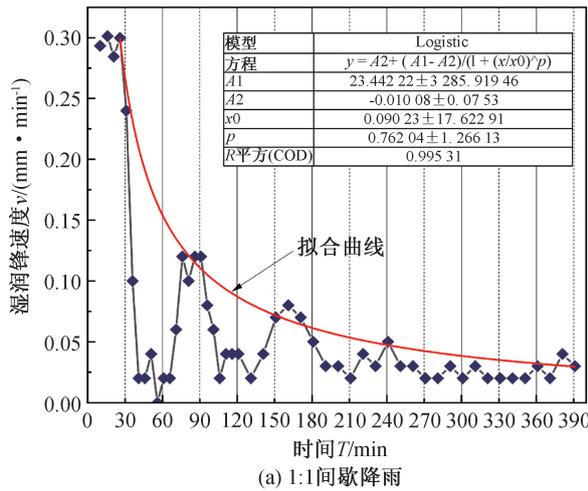


图6 不同降雨间歇时间比下土柱湿润锋速度随时间变化散点图

Fig.6 Scatter plot of soil column wetting front velocity with time under different ratios of rainfall and intermittent time

雨间歇条件下的衰减拟合。拟合结果表明间歇降雨条件下湿润锋速度衰减符合 logistic 模型,降雨间歇时间比 1:1、1:2、2:1 试验曲线拟合优度 R^2 分别为 0.995 31、0.995 20、0.998 61。

(2)在降雨与间歇时间比 2:1 的条件下,其对降雨响应特征不明显。根据表 6 此组试验在 51 min 时产生积水,并且在后续循环中积水一直存在,相对于 1:1 间歇降雨循环试验组,其积水时间提前 37.03%。这是由于在第一个降雨循环过程中表层土体饱和,湿润锋速度在第一个降雨间歇期间就已经大幅衰减,同时土体内水分迁移速度也减弱,使得土体对降雨入渗没有明显响应。

表 6 不同间歇降雨条件下土体积水时间

Tab. 6 The time that water accumulating on the surface of the soil under different intermittent rainfall conditions

降雨间歇时间比	首次积水时间 T/min
1:1	81
1:2	281
2:1	51

(3)在降雨间歇时间比 1:2 循环条件下,土体湿润锋速度在第一个降雨停歇期大幅衰减,甚至出现停止入渗的现象。相对于降雨间歇时间比 1:1 条件下,其在第二个循环降雨后的湿润锋速度峰值远小于降雨间歇时间比 1:1 试验组。这是因为此组在降雨时间、降水量相同的情况下,降雨间歇时间比 1:2 试验组经历更长的土体内水分再分布时间,使得水分迁移深度增加,而土体入渗率对降雨的响应与水分迁移用时相关,水分迁移深度的增加使得水分迁移用时增加,因此在第二个降雨期间湿润锋速度上升恢复慢。并且在随后的降雨循环过程中土体一直表现出明显的降雨响应。

2.2.2 不同降雨间歇比对累计入渗深度的影响

图 7 为不同降雨间歇时间比条件下土体湿润锋深度随时间变化曲线,根据图 7 可知:

(1)整个湿润锋深度曲线呈现出三阶段变化,第一阶段湿润锋深度随时间增加较为迅速,这段时间土柱表面未出现积水,土体的含水率较低,基质吸力较大。其中降雨间歇时间比为 1:1 和 1:2 的试验曲线第二阶段呈现出波动上升的趋势,表现出湿润锋对降雨条件变化的响应,而降雨间歇时间比为 2:1 的试验组曲线波动不明显。第三阶段湿润锋深度增加速率逐渐变得平缓,湿润锋深度随时间呈现匀速变化。

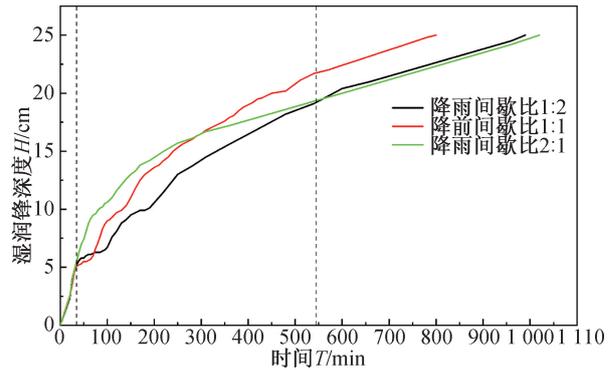


图 7 不同降雨间歇时间比条件下土体累计入渗深度随时间变化曲线

Fig. 7 Variation curve of cumulative soil infiltration depth with time under different ratios of rainfall and intermittent time

(2)降雨间歇时间比 2:1 循环下,土体的累计入渗深度随时间变化曲线没有出现对降雨的响应,在 330 min 前高于降雨间歇时间比 1:1 试验曲线,在 330 min 处交叉,而后低于降雨间歇时间比 1:1 试验曲线。这表明在循环历时较短时,相同时间内由于降雨间歇时间比 2:1 条件下土体获得水量更多,使得土体有更大的累计入渗深度。而后随着土体逐渐饱和度增加,湿润锋速度逐渐衰减,长历时下其入渗深度小于降雨间歇时间比 1:1 试验组。

(3)相比较于降雨间歇时间比 1:1 试验组,降雨间歇时间 1:2 循环下,曲线随着降雨启动和间歇的波动更加明显。在相同降雨间歇循环历时中,其获得水量少,导致入渗深度小,但也经历了更长的停歇期,水分重分布更加彻底,因此曲线对降雨的响应更加明显。

3 结论

1)在降雨间歇时间比 1:1 条件下,低含量(质量分数 0.05%、0.10%)的聚苯乙烯微球有着促进土体水分入渗的作用,增大土体水分迁移速度,因而土体入渗湿润锋速度对降雨响应更加敏感,滞后时间减小。高含量(质量分数 0.25%、0.50%)聚苯乙烯微球会抑制土体的水分入渗,并且使得土体对降雨响应滞后时间增长。

2)在时间和水量相同的条件下,低含量的聚苯乙烯微球会增大湿润锋深度,高含量的聚苯乙烯微球则表现出减小湿润锋深度,也即低含量的聚苯乙烯微球会降低土体的持水能力,而高含量的聚苯乙烯微球会增强土体的持水能力。

3)在间歇降雨循环条件下,土体的湿润锋速

度随着间歇降雨循环的增加而逐步衰减,湿润锋速度衰减曲线符合 logistic 模型,并且具有较好的拟合优度。

4)在降雨间歇时间比 2:1 的条件下,其对降雨响应特征不明显,与降雨间歇时间比 1:1 试验组相比,短历时情况下其湿润锋深度增大,而长历时情况下湿润锋深度减小。在降雨间歇时间比 1:2 循环条件下,湿润锋速度衰减更快,由于土体内部水分重分布更加彻底,湿润锋速度对降雨的响应更加明显。

参考文献:

- [1] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at Sea: Where Is All the Plastic? [J]. *Science*, 2004, 304: 838.
- [2] NAPPER I E, BAKIR A, ROWLAND S J, et al. Characterisation, Quantity and Sorptive Properties of Microplastics Extracted from Cosmetics [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99: 178-185.
- [3] CARR S A, LIU J, TESORO A G. Transport and Fate of Microplastic Particles in Wastewater Treatment Plants [J]. *Water Research*, 2016, 91(15): 174-182.
- [4] DUIS K, COORS A. Microplastics in the Aquatic and Terrestrial Environment: Sources (with a Specific Focus on Personal Care Products), Fate and Effects [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, 28(2): 1-25.
- [5] WU P F, HUANG J S, ZHENG Y L, et al. Environmental Occurrences, Fate, and Impacts of Microplastics [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019, 184: 109612.
- [6] 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(6): 28-31.
- [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] De Souza Machado A A, LAU C W, TILL J, et al. Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17): 9656-9665.
- [9] JIANG X J, LIU W J, WANG E H, et al. Residual Plastic Mulch Fragments Effects on Soil Physical Properties and Water Flow Behavior in the Minqin Oasis, Northwestern China [J]. *Soil Till Res*, 2017, 166: 100-107.
- [10] ZHANG G S, ZHANG F X, LI X T. Effects of Polyester Microfibers on Soil Physical Properties: Perception From a Field and a Pot Experiment [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 670: 1-7.
- [11] De Souza Machado A A, LAU C W, KLOAS W, et al. Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53: 6044-6052.
- [12] 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.
- [13] 覃超,郑粉莉,刘沛峰,等. 玉米秸秆汁土壤改良剂对黄绵土抗侵蚀能力的影响 [J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 367-378.
- [14] 晏洪清,原翠萍,雷延武,等. 降雨类型和水土保持对黄小区小流域水土流失的影响 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(02): 169-175.
- [15] 郝永丽,胡亚鲜,白晓雄,等. 黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 [J]. *环境科学*, 2022, 43(09): 4748-4755.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 32 页)

- [3] 尹阳阳,胡少伟,王宇航. 自重对混凝土三点弯曲梁断裂性能的影响 [J]. *工程力学*, 2019, 36(7): 48-56, 108.
- [4] 吴智敏,徐世焯,丁一宁,等. 砼非标准三点弯曲梁试件双 K 断裂参数 [J]. *中国工程科学*, 2001, 3(4): 76-81.
- [5] 赵艳华,徐世焯. 跨高比对混凝土双 K 断裂参数的影响 [J]. *三峡大学学报: 自然科学版*, 2002, 24(1): 35-41.
- [6] 范向前,胡少伟,陆俊. 非标准混凝土三点弯曲梁双 K 断裂韧度试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(10): 152-157.
- [7] 徐世焯,熊松波,李贺东,等. 混凝土断裂参数厚度尺寸效应的定量表征与机理分析 [J]. *土木工程学报*, 2017, 50(5): 57-71.
- [8] XIE J, LIU Y, YAN M L, et al. Mode I Fracture Behaviors of Concrete at Low Temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 323: 126612.
- [9] 胡少伟,米正祥. 基于扩展有限元法的混凝土裂缝扩展过程数值模拟 [J]. *水利学报*, 2014(S1): 51-56.
- [10] SL 352—2006, 水工混凝土试验规程 [S].
- [11] 尹阳阳,胡少伟. 小跨高比混凝土三点弯曲梁双 K 断裂参数研究 [J]. *工程力学*, 2020, 37(12): 138-146, 170.

(责任编辑 周雪梅)