

不同有机物料对黄土高原治沟造地土壤水分运移的影响

舒方瑜^{1,2,3}, 董勤各^{1,2,3}, 冯浩^{1,2,3}, 李成^{1,3}, 韩剑桥², 张体彬^{1,2}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了改善黄土高原治沟造地土壤结构较差的问题,采用一维定水头土柱模拟试验,探讨了不同有机物料(生物有机肥、粉碎秸秆、50%粉碎秸秆+50%生物有机肥、尿素、对照)对治沟造地土壤湿润锋推移、累积入渗量、入渗速率和土壤水分蒸发特征的影响,并采用 Green-Ampt 模型、Philip 模型和 Kostiakov 模型拟合分析土壤水分入渗规律。结果表明:(1)粉碎秸秆与有机肥均降低了土壤水分移动速率,增强了土壤持水能力;粉碎秸秆同时降低了土壤稳定入渗速率,与对照相比减小了 17.65%;(2)湿润锋推进深度与累积入渗量呈良好的线性关系;通过对 3 种入渗模型拟合发现,Philip 模型和 Kostiakov 模型的拟合效果较好,符合黄土高原治沟造地土壤入渗率和时间的动态关系;(3)土壤水分蒸发过程中,添加粉碎秸秆具有阻截和蓄积土壤水分,提高土壤含水量的积极作用。

关键词: 治沟造地; 有机物料; 土壤水分入渗; 入渗模型; 土壤水分蒸发

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0074-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.01.011

Effects of Different Organic Materials on Water Movement in Gully Land Consolidation Soil on the Loess Plateau

SHU Fangyu^{1,2,3}, DONG Qinge^{1,2,3}, FENG Hao^{1,2,3},

LI Cheng^{1,3}, HAN Jianqiao², ZHANG Tibin^{1,2}

(1.College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Water and Soil Conservation, Northwest

A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.Key Laboratory of Agricultural Water and Soil

Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Aiming at the problem of how to improve the gully land consolidation soil poor structure in the Loess Plateau, the vertical one-dimensional stable water potential infiltration experiments were conducted to explore the effects of different organic materials (bio-organic fertilizer, crushed straw, 50% crushed straw + 50% bio-organic fertilizer, Urea, CK) on gully land consolidation soil's wetting front movement, cumulative infiltration, infiltration rate, and soil water evaporation characteristics. Green-Ampt model, Philip model and Kostiakov model were used to fit and analyze the regularity of soil moisture infiltration. The results showed that: (1) Crushed straw and bio-organic fertilizer both reduced the soil water movement rate and enhanced soil water holding capacity; crushed straw simultaneously reduced the soil stable infiltration rate, which was 17.65% lower than CK. (2) There was a good linear relationship between wetting front depth and the cumulative infiltration; by fitting the three infiltration models, it was found that the Philip model and Kostiakov model had the best fitting effect, which were more in line with the Dynamic relationship between soil infiltration rate with time in gully land consolidation soil on the Loess Plateau. (3) In the process of soil water evaporation, adding crushed straw had a positive effect on blocking and accumulating soil moisture and increasing soil water content.

Keywords: gully land consolidation; organic materials; soil water infiltration; infiltration model; soil water evaporation

收稿日期:2021-06-22

资助项目:陕西省重点研发计划项目(2019NY-190)

第一作者:舒方瑜(1996—),男,硕士研究生,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:fyshu0724@sina.com

通信作者:董勤各(1982—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事节水灌溉方法与技术、土壤水盐运移调控与模拟研究。E-mail:qgdong2011@163.com

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一。为保护脆弱的生态环境,我国于 1999 年实施退耕还林(草)工程。然而,退耕还林(草)工程的实施导致局部地区出现了粮食生产与供应紧张的局面^[1]。为应对粮食安全问题,陕西延安等地区开展了“治沟造地”工程。然而,重型机械里切外垫、将坡地变为平地的技术模式,以及机械来回碾压导致熟土被压、土壤结构遭到破坏,对作物生长产生负面影响^[2]。这与黄土高原地区承担重要粮食生产任务的局面相矛盾。因此,改善新造耕地土壤结构,提高区域有限水资源蓄持与利用潜力,对该地区农业的可持续发展和生态环境保障具有重要意义。

土壤水分入渗是地表水转化为土壤水的重要过程,土壤水分蒸发则是土壤水以水蒸气的形式散失到大气的过程,两者均是农田水分循环的重要环节^[3],影响水分利用特征和作物产量^[4]。土壤水分入渗和蒸发主要受土壤质地、含水量、结构稳定性等因素的影响^[5]。已有研究^[6]表明,施加有机肥能抑制蒸发,增加水分入渗,显著提高收获时的土壤含水量。施加有机肥不仅有利于土壤大团聚体的形成^[7],还能改善土壤团聚体结构及其稳定性,有利于土壤孔隙状况的提高^[8]。有机肥在土壤微生物的作用下,增加了腐殖质含量,而腐殖质多为亲水胶体,进而提高了土壤的保水能力^[9]。秸秆还田作为一种常见的措施,有关秸秆改良土壤结构的研究较多。已有研究^[10]表明,粉碎秸秆具有较大的比表面积,对水分的黏附力较强,施加粉碎秸秆可以提高土壤的持水能力,改善土壤结构。秸秆均匀加入土壤较秸秆覆盖更能提高土壤结构的稳定性^[11]。入渗时,秸秆改变了土壤水分时空分布特征,能明显增加土壤含水率^[12]。秸秆还田能切断土壤的毛细作用,减弱大气和土壤的对流来抑制蒸发^[13]。

前人对施用有机肥和秸秆对土壤保水保肥能力进行了大量研究,但关于有机物料对黄土高原新造土地改良下土壤水分运移规律的研究较少。因此,本研究拟设置 3 种有机物料措施,按照当地实际施肥情况,探究其改变治沟造地土壤水分运移特性,通过理论计算与试验验证相结合的方法,旨在探究有机物料添加对治沟造地土壤水分入渗与蒸发的影响。研究结果可为黄土高原治沟造地土壤水分运移规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自陕西省延安市安塞区石窑沟川地试验场,从土表至 40 cm 深度每隔 10 cm 取土。原状土风干、碾压、过 2 mm 筛后均匀混合后备用。土壤初始含水率为 1.18%,饱和含水率为 26.78%,田间持水量为 21.89%,pH 为 8.10,EC_{1:5} 为 179 μS/cm。利用 Master-sizer 3000 型激光粒度仪测定土壤颗粒组

成,测得其砂粒含量为 21.52%,粉粒含量为 61.5%,黏粒含量为 16.98%。按照国际制土壤质地分类标准,将供试土壤划分为粉壤土。

试验共设 5 个处理:生物有机肥+尿素+磷酸二铵(ON);粉碎秸秆+尿素+磷酸二铵(FN);50%生物有机肥+50%粉碎秸秆+尿素+磷酸二铵(OFN);尿素+磷酸二铵(N)和不施肥(CK)。其中,生物有机肥由粉碎秸秆、菌渣、油渣及聚丙烯酰胺(PAM)发酵制成,全氮含量约 6.72%;粉碎秸秆(3~5 cm)全氮含量 6.46 g/kg。当地施肥量为 N 180 kg/hm²,试验土柱按照“等氮”和“有机物料等量”原则装填有机物和化肥,具体比例见表 1。

表 1 不同有机物料添加量

单位:kg/hm²

处理	生物有机肥	秸秆	尿素	磷酸二铵
ON	1250	0	142	140
FN	0	13000	142	140
OFN	625	6500	142	140
N	0	0	322	140
CK	0	0	0	0

1.2 试验装置和测定方法

试验装置主要包括供水马氏瓶和土柱,均为透明有机玻璃制成。马氏瓶内径 15 cm,高 47 cm,定水头供水,外标刻度读取入渗水量。土柱内径 20 cm,土柱自底部向上,每隔 5 cm 设置取土小孔。土柱外标刻度记录湿润锋推进过程。

将试验所需用料与土壤混合均匀后,按容重 1.40 g/cm³每 10 cm 装入土柱,分层界面处打毛,装土高度 60 cm。装填前,先在土柱底部放 1 张与土柱截面积相同的滤纸。装填完毕后再在土壤表面放置 1 张与土柱截面积相同的滤纸,防止马氏瓶供水时对土壤表面的冲刷。供水马氏瓶用于以稳定水头形式连续供水。马氏瓶位置水头为 0.97 m。土柱入渗试验表层土壤积水深度 2.5 cm。试验过程中,按照先密后疏的原则,观察马氏瓶内水位及土柱湿润锋变化过程。

入渗结束后,静止 48 h 使土柱内土壤初步完成水分再分布,然后取 1 次土样,作为蒸发试验的初始条件。取样位置分别距土表 5,15,25,35,45,55 cm。此后每隔 10 天取 1 次土样,采用烘干法计算土壤质量含水率。整个蒸发过程历时 30 天。

1.3 指标计算

(1)灌水定额计算公式^[14]为:

$$M=H(\theta_{\max}-\theta_0)\gamma$$
 (1)

式中:H 为土壤计划湿润层深度,取 60 cm; $\theta_{\max}$ 为土壤计划湿润层所允许的最大含水率(占干土重),一般为田间持水率,取 21.89%; θ_0 为土壤计划湿润层初始含水率(占干土重),取 1.18%; γ 为土壤容重,取 1.40 g/cm³。因此,通过公式计算灌水量为 17.40 cm。

(2)土壤贮水量(体积含水量,%)计算公式为:

$$W=\sum(W_i\times D_i\times H_i/10) \tag{2}$$

式中: W 为土壤贮水量(mm); W_i 为某一层土壤质量含水量(%); D_i 为某一层土壤容重(g/cm^3); H_i 为某一层的土壤厚度(cm)。

1.4 模型模拟

为系统研究不同有机物添加对土壤入渗过程的影响,拟采用 Green-Ampt 模型、Philip 模型和 Kostakov 模型来拟合分析灌溉水入渗率和入渗时间的动态特征。

(1)Green-Ampt 模型

该模型适用于当历时较长或积水深度较浅的情况,可表示为:

$$i=(K_s(\theta_s-\theta_i)S_f)\frac{1}{I}+K_s \tag{3}$$

式中: i 为地表入渗率(cm/min); K_s 为土壤饱和导水率(cm/min); θ_s 为土壤饱和含水率(cm^3/cm^3); θ_i 为土壤初始含水率(cm^3/cm^3); S_f 为湿润锋处的土壤水吸力(cm); I 为累积入渗量(cm)。

(2)Philip 模型

$$i=\frac{1}{2}St^{-0.5}+A \tag{4}$$

式中: i 为地表入渗率(cm/min); S 为土壤吸渗系数($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$); A 为稳定入渗率(cm/min); t 为入渗时间(min)。

(3)Kostiakov 模型

$$i=Kt^{-a} \tag{5}$$

式中: i 为地表入渗率(cm/min); t 为入渗时间(min); K 为拟合指数,在数值上等于第 1 单位时间末的入渗速度; a 为经验指数,反映土壤入渗能力的衰减速度,决定于土壤性质和初始含水率。

(4)湿润峰深度和累积入渗量的线性拟合公式为:

$$I=CZ_f \tag{6}$$

式中: I 为累积入渗量(cm/min); Z_f 为湿润锋深度(cm); C 为拟合参数。

1.5 数据统计分析

本研究采用 Excel 2019 软件进行数据处理,Sigmaplot 14.0 软件进行作图,SPSS 22.0 软件进行数据拟合与分析。

2 结果与分析

2.1 有机物料添加对土壤水分入渗特征的影响

2.1.1 湿润锋深度随时间的变化 湿润锋是指水分下渗过程中湿润层下缘明显的干湿交界锋面,其与土表的垂直距离即为湿润锋深度。由图 1 可知,不同处理下湿润峰推进深度整体上由快到慢。从入渗时长来看, FN 达到计划湿润层的历时最长,为 790 min;

N 达到计划湿润层的历时最短,为 580 min。在同一入渗历时,湿润峰深度大致为 $N>CK>ON>OFN>FN$ 。入渗 420 min 时, N 和 CK 的湿润峰深度为 48.0, 47.2 cm,湿润峰深度变化速度较慢的 ON、OFN 和 FN 分别为 43.8, 43.0, 38.0 cm。这可能是由于有机肥中的 PAM 溶于水后使水分黏滞度增加,导致水分穿过土壤孔隙时阻力增加,抑制了湿润峰推进。当湿润峰推进至秸秆与土壤的交界面时,由于秸秆与土壤之间的存在的孔隙造成了导水能力的变化;湿润峰在推进过程中,秸秆内部孔隙中的部分空气来不及排出就被水分禁锢在土壤内部,形成封闭气泡,使土壤的渗透系数减小^[15],阻碍了水分的入渗。说明施生物有机肥和秸秆均能降低水分在土壤中的运移速率,延长土壤水分蓄存时间,增强了土壤持水能力,这与张丽华等^[16]的研究结果一致。此外, OFN 与 ON 相比湿润峰运移速率略慢,而 OFN 和 FN 湿润峰运移速率相差较大。说明秸秆阻碍湿润峰运移的能力比有机肥强。

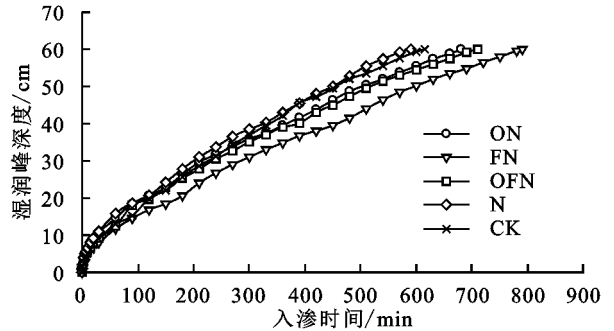


图 1 不同有机物料添加下湿润峰深度随时间变化趋势

2.1.2 累积入渗量的变化 土壤累积入渗量是指单位面积渗入土壤的水量,是土壤水分运动的主要特征之一。由图 2 可知,所有处理的累积入渗量均随时间推移而增加,但增加速率逐渐减慢,达到灌水定额所需历时 $FN>ON>OFN>CK>N$ 。在 240 min 以后,所有施肥处理与不施肥的差异逐渐增加。N 的累积入渗量增速高于 FN,这可能是因为未溶解的化肥颗粒较大,增加了土壤孔隙,使得土壤入渗能力增强;而秸秆施用阻碍了土壤水分入渗,由于秸秆能阻断土壤毛管空隙,导致土壤入渗能力下降^[17]。

利用过原点的线性方程对湿润峰深度和累积入渗量进行拟合。由表 2 可知,湿润峰深度与累积入渗量之间具有良好线性关系,各处理决定系数 R^2 均达到了 0.99 以上,说明拟合效果较好。参数 C 的变化规律为 $N>OFN>CK>FN>ON$ 。其中, ON 和 FN 的 C 值较 CK 小,说明了生物有机肥和秸秆对灌溉水的阻渗均较为明显。可能是因为生物有机肥中的 PAM 分子溶胀黏结,使土壤孔隙发生变化,强化了土壤持水能力,使湿润峰推进受阻;而秸秆与土壤之间孔隙造成

导水差异^[18],使得湿润峰经过秸秆周围时推进速度变慢,提高了土壤持水能力^[19],导致水分入渗形式发生变化。但本研究发现,OFN 的参数 C 值较 CK 高,这是由于土壤和秸秆的孔隙状况不同,秸秆内部孔隙又以大孔隙居多。当秸秆数量不多的情况下,可能存在一部分水分通过秸秆中的大孔隙入渗,导致 OFN 的湿润峰推进在入渗初期不均匀^[20];随着入渗过程的进行,秸秆内部含水率达到一定程度时,与周围土壤导水能力趋于一致,湿润峰推进的不均匀性逐渐消失^[21],湿润峰推进速度逐渐减慢。

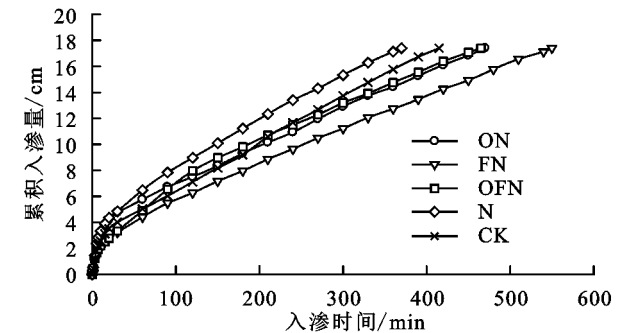


图 2 不同有机物料添加下累积入渗量随时间变化特征

表 2 不同有机物料添加下湿润峰深度与累积入渗量线性拟合效果

处理	ON	FN	OFN	N	CK
C	0.3629	0.3704	0.3793	0.4009	0.3726
R ²	0.9982	0.9995	0.9995	0.9982	0.9983

2.1.3 入渗速率的变化 入渗速率是指单位时间通过地表单位面积入渗至土壤中的水量^[22]。图 3 为不同有机物添加下入渗速率随时间的变化情况,各处理的入渗率整体呈“L”形。在入渗初始阶段(0~20 min),在土壤基质势和重力势的双重影响下,此阶段水分入渗非常迅速。在入渗稳定前阶段(20~150 min),随着入渗的不断进行,土壤基质势不断减弱,水分入渗主要受重力的影响,入渗速率急剧减小。在入渗稳定阶段(150~550 min),基质势逐渐减弱至零,入渗速率逐渐趋于稳定,此时水分入渗只受重力作用下渗。在 20 min 时,ON 处理的入渗速率最大,为 0.113 cm/min,可能的原因是土体表面生物有机肥分布较少,当 PAM 质量分数较小时,能使土壤有效孔隙度增大,增加土壤通透性。入渗稳定阶段,N 和 CK 的稳定入渗速率较为接近,均为 0.034 cm/min;FN 的稳定入渗速率最小,为 0.028 cm/min,分别较 N 和 CK 降低 22.22%和 17.65%。

表 3 为 Green-Ampt 模型、Philip 模型和 Kostia-kov 模型拟合的入渗率和时间变化的动态特征。 K_s 为饱和导水率,主要受土壤质地、孔隙分布、容重等因素影响。Green-Ampt 模型模拟下 ON 处理的 K_s 较 N 处理高,原因是 PAM 质量分子较小时,吸收水分

膨胀,提高土壤孔隙度,增强土壤通透性,这与张春强等^[23]的研究结果一致。但是 FN 和 OFN 处理的饱和导水率较其他处理显著的小,可能是由于添加的秸秆与土壤之间孔隙改变了土壤的导水能力,秸秆孔隙中部分空气来不及排出形成封闭气泡阻碍了水分下渗,当粉碎秸秆还田含量较大时,秸秆粉末随着水分的入渗严重堵塞土壤孔隙也是原因之一^[24]。Green-Ampt 模型的决定系数 R^2 在 0.803~0.899。

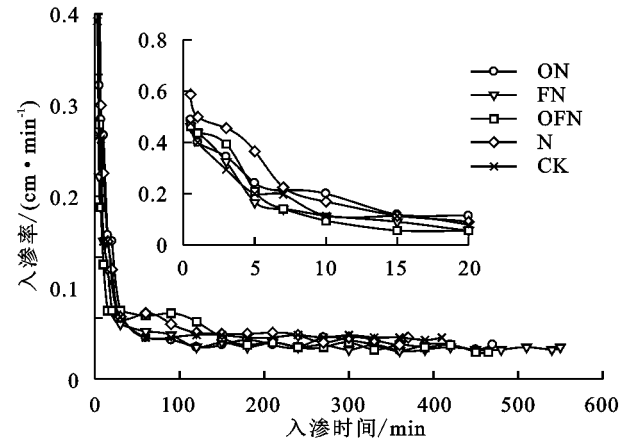


图 3 不同有机物料添加下入渗率随时间变化关系

Philip 模型中吸渗率越大说明土壤入渗能力越强,越小则说明土壤入渗能力越弱。N 处理的吸渗率 S 最大,原因是化肥颗粒随着入渗时间的延长而溶解,增加了土壤的孔隙,进而提高了入渗能力。稳定入渗率与饱和导水率呈正相关关系,添加秸秆的 FN 与 OFN 处理的稳定入渗率显著降低,进一步说阐明了秸秆具有阻碍水分入渗的能力。Philip 模型的决定系数 R^2 在 0.851~0.944。

Kostiakov 模型模拟后的 K 值在 0.328~0.529, K 值越大,表明土壤入渗曲线的斜率越大,瞬时入渗率衰减速度越快。瞬时入渗率衰减速度顺序为 $N > ON > CK > OFN > FN$ 。通过 Kostiakov 模型拟合得出的经验指数 a 决定于土壤性质和初始含水率,添加了秸秆的 FN 拟合出的经验指数 a 较 CK 小,表明土壤的初始入渗速率最小。Kostiakov 公式的决定系数 R^2 在 0.848~0.949;通过对 3 个人渗模型 R^2 的比较发现,Philip 模型和 Kostiakov 模型均能描述不同有机物料添加下入渗率随时间变化的关系。

2.2 有机物料添加对土壤水分蒸发的影响

图 4 为不同有机物添加下蒸发历时与土壤剖面含水率的关系。由于不同有机物添加对土壤水分入渗和蒸发特性的影响不同,导致各处理之间土壤含水率的明显差异。由图 4 可知,随着蒸发的进行,各土柱脱水过程进展有序,其中 0—30 cm 土层脱水表现尤为明显。土壤水分损失速率主要与土壤供水能力和蒸发强度有关,不同处理的水分损失速率为 $N > CK > ON > OFN > FN$ 。土壤水分在毛管力作用下能

向上运移,可补充由土表蒸发而造成的水分损失^[25]。有机肥中的 PAM 增加了土壤团聚体稳定性,改善土壤结构,而 FN 和 OFN 处理中掺混的秸秆阻碍了土壤毛管,土壤水分向上运移的能力减弱,导致 FN 处理在 0—30 cm 土层含水率明显高于其他处理,这与赵永敢等^[26]的研究结果一致。添加秸秆具有阻截和蓄

积水分,提高土壤含水率的作用。在 30 天的蒸发历时中,FN 和 OFN 处理始终在 0—30 cm 的土壤含水率始终高于其他处理。第 30 天,FN 和 OFN 处理在 0—30 cm 土层处的平均含水率较 N 处理分别提高 15.49%和 10.01%。这对增加黄土高原治沟造地土壤耕层的含水率,提高降雨和灌水的利用效率具有重要意义。

表 3 不同有机物添加下入渗模型拟合参数特征

处理	Green-Ampt 模型			Philip 模型			Kostiakov 模型		
	K_s	S_f	R^2	S	A	R^2	K	a	R^2
ON	0.044	7.948	0.803	0.772	0.016	0.911	0.477	0.507	0.872
FN	0.030	11.839	0.821	0.747	0.004	0.944	0.328	0.450	0.949
OFN	0.032	10.551	0.868	0.764	0.007	0.896	0.351	0.456	0.903
N	0.041	12.600	0.899	0.972	0.016	0.851	0.529	0.509	0.848
CK	0.043	7.786	0.876	0.752	0.015	0.905	0.365	0.438	0.918

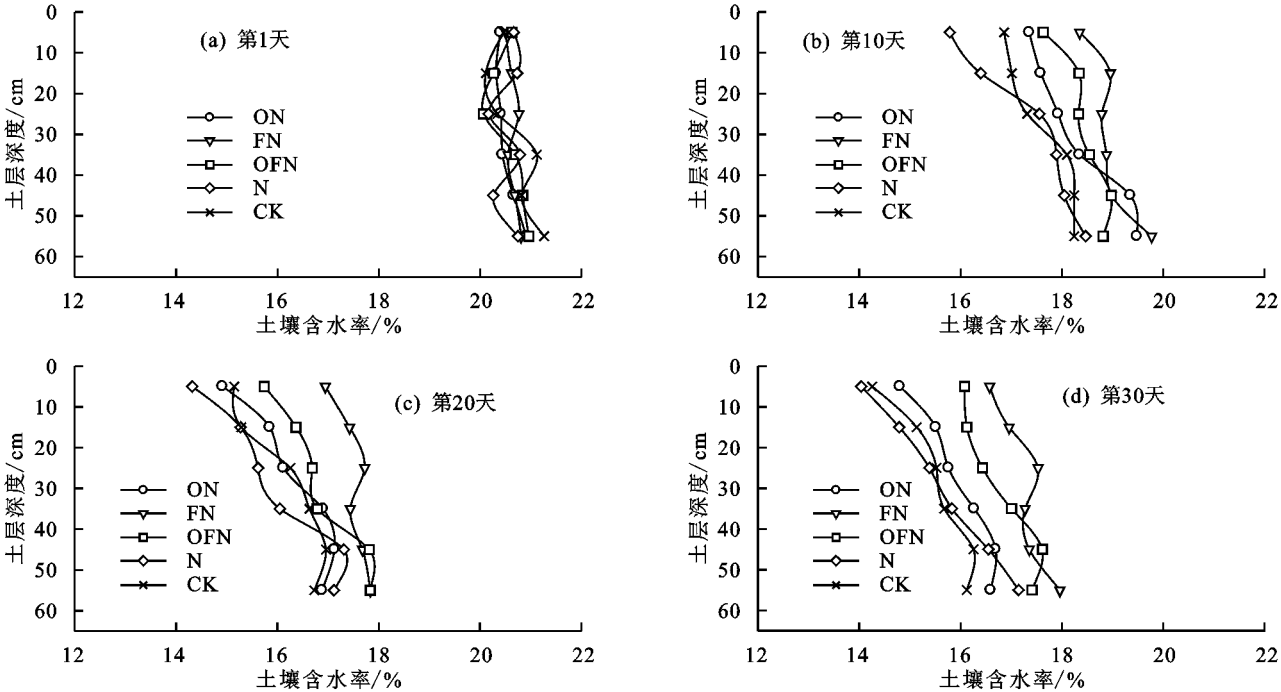


图 4 有机物料添加下土壤剖面含水率随蒸发历时的变化特征

2.3 有机物料添加对土壤贮水量的影响

由图 5 可知,各处理 0—60 cm 土壤贮水量在蒸发初始时差异不大,随着蒸发历时的增加,FN 和 OFN 处理较其他处理相比,0—60 cm 土壤贮水量差异逐渐明显,而 ON、N 和 CK 处理 0—60 cm 土壤贮水量差异不明显。在蒸发的 1~10 天中,ON 处理的保水能力较为明显;第 30 天,FN 与 N 处理相比,0—60 cm 土壤贮水量提高了 10.57%,而 ON 较 N 处理只提高了 2.02%,这表明添加秸秆对土壤水分的增加有着重要的意义。此外,蒸发初始时各层贮水量分布较均匀,而随着蒸发历时的进行,各处理耕层(0—30 cm)土壤贮水量变化较为明显,而深层的土壤贮水量变化不明显,而秸秆的添加使得 FN 和 OFN 处理在 0—30 cm 土壤贮水量始终高于其他处理。随着蒸发的进行,FN 处理最有利于保持土壤水分,其次为 OFN,而 ON 处理在 10 天后,保持土壤水分的能力逐渐下降,在第

20 天之后与 N 和 CK 处理差异不明显。

保水剂吸水膨胀、释水收缩的过程可以明显改善土壤孔隙度。PAM 具有很强的吸附能力,在土壤中吸水后形成凝胶状态,堵塞土壤大孔隙,这使土壤在前期具有良好的保水效果。而本研究使用的有机肥是生物发酵后的产物,其丰富的菌丝经过一段时间后将土壤微黏粒交织并形成微团聚体,使土壤孔隙增大,提高了水汽扩散率^[27],使 ON 处理在后期土壤蒸发增大。FN 处理在 0~30 天的土壤贮水量始终高于其他处理,可能是由于秸秆阻断了土壤毛管的形成,降低了土壤蒸发速率。但这与王增丽等^[28]的结果不符,原因是该研究使用的秸秆经过人工气候箱培养,导致秸秆在试验的过程中加速分解,消耗了土壤水分。本研究的结果表明,随着秸秆施入量的增加,0~30 天的土壤贮水量也随之增加,这表明秸秆对抑制土壤蒸发,提高土壤的抗旱性有着积极的作用。

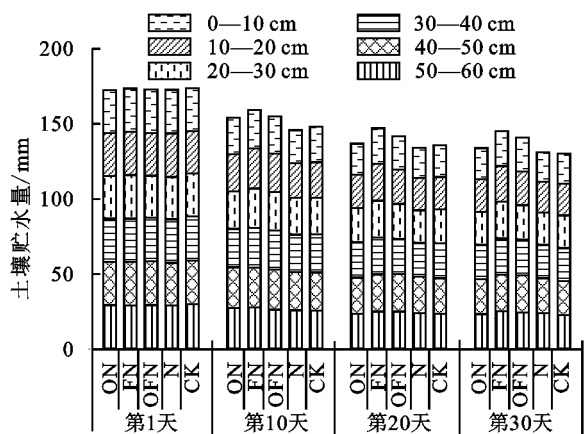


图 5 有机物料添加下蒸发历时与土壤贮水量的关系

3 结论

(1)入渗过程中,粉碎秸秆阻碍湿润峰运移的能力比生物有机肥更强,且添加的秸秆越多,湿润峰受阻的程度越强烈。粉碎秸秆和生物有机肥均减小了土壤稳定入渗速率,使其稳定在 0.028 cm/min。秸秆与生物有机肥均降低了水分在土壤中的移动速度,延长水分在土壤中的停留时间,增强了土壤的持水能力。

(2)入渗过程中,湿润锋深度与累积入渗量呈良好的线性关系;通过对 3 种入渗模型拟合后发现,Philip 模型和 Kostiakov 模型的模拟效果较好,符合黄土高原治沟造地土壤入渗率和时间关系。

(3)蒸发过程中,添加秸秆具有阻截和蓄积水分,提高土壤含水率和土壤贮水量的作用,在第 30 天, FN 在 0—30 cm 土层处的平均含水率较 N 提高了 15.49%;0—60 cm 的土壤贮水量提高了 10.57%。

参考文献:

[1] Chen Y, Wang K B, Lin Y S. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 10(8): 739-741.

[2] 付威,雍晨旭,马东豪,等.黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应[J].农业工程学报,2019,35(21):252-261.

[3] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:126-156.

[4] 魏俊岭,金友前,邵红建,等.施肥措施对砂姜黑土水分入渗性能的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(8):965-971.

[5] 董勤各,冯浩,庄文化.聚丙烯酸钠对 3 种土壤质地入渗特征的影响[J].中国水土保持科学,2010,8(1):81-86.

[6] 崔红艳,许维成,孙毓民,等.施用有机肥对土壤水分、胡麻产量和品质的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):307-312.

[7] 闫雷,董天浩,喇乐鹏,等.免耕和秸秆还田对东北黑土区土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].农业工程学报,2020,36(22):181-188.

[8] 李彦需,邵明安,王娇.蚯蚓粪施用量对黄土区典型土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].农业工程学报,2021,37(3):90-98.

[9] 李彦需,邵明安,王娇.蚯蚓粪覆盖对土壤水分蒸发过程

的影响[J].土壤学报,2018,55(3):633-640.

[10] 张宏媛,逢焕成,卢闯,等.CT 扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J].农业工程学报,2019,35(6):114-122.

[11] 蔡太义,贾志宽,孟蕾,等.渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):43-48.

[12] Qiu Y, Xie Z K, Wang Y J, et al. Influence of gravel mulch stratum thickness and gravel grain size on evaporation resistance [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1908-1913.

[13] 郭华,樊贵盛.冻融土壤 Kostiakov 入渗模型参数的非线性预报模型[J].节水灌溉,2015,243(11):1-4.

[14] 汪志农.灌溉排水工程学[M].北京:中国农业出版社,2000:40.

[15] 吴争光,张华.积水入渗稳定时近饱和土中封闭气泡含量试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(2):274-279.

[16] 张丽华,徐晨,于江,等.半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):299-306.

[17] 赵玥,韩巧玲,赵燕东.基于 CT 扫描技术的土壤孔隙定量表达优化[J].农业机械学报,2017,48(10):252-259.

[18] 王春颖,毛晓敏,赵兵.层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟[J].农业工程学报,2010,26(11):61-67.

[19] 于健,雷廷武,Isaac S,等.PAM 特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J].土壤学报,2011,48(1):21-27.

[20] 陈晓冰,韦灵,吴晗,等.秸秆覆盖下桂北岩溶区水稻田土壤优先流特征[J].水土保持学报,2020,34(5):124-130.

[21] 张婧,雷廷武,胡雅琪,等.优先流影响下环式入渗仪内入渗过程可视化试验[J].农业机械学报,2015,46(4):155-160.

[22] 樊贵盛,李雪转,李红星.非饱和土壤介质水分入渗问题的试验研究[M].北京:中国水利水电出版社,2012:22-23.

[23] 张春强,冯浩.PAM 与尿素混施对渭北旱塬苹果生长及产量品质的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):174-177,216.

[24] 孙荣国,韦武思,王定勇.秸秆—膨润土—PAM 改良材料对砂质土壤饱和和导水率的影响[J].农业工程学报,2011,27(1):89-93.

[25] Wang T T, Stewart C E, Sun C C, et al. Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils [J]. Catena, 2018, 162: 29-39.

[26] 赵永敢,王婧,李玉义,等.秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J].农业工程学报,2013,29(23):109-117.

[27] 吴军虎,李玉晨,邵凡凡,等.生化黄腐酸对土壤物理性质及水分运动特性的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):159-164,171.

[28] 王增丽,王珍,冯浩.预处理秸秆对土壤蒸发及秸秆分解率的影响[J].排灌机械工程学,2013,31(9):816-821.