

秸秆和塑料残膜对农田土壤水分入渗的影响

余小玲^{1,2,3}, 白晨赞⁴, 刘琦^{1,2,3}, 韩晓阳^{1,4}, 乔江波^{1,4}, 朱元骏^{1,2,3,4}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.中国科学院大学,北京 100049; 4.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(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:黄土高原旱作农田中秸秆残体与地膜广泛共存,为探究其对土壤水分入渗的影响,开展室内土柱入渗模拟研究。设置2个秸秆添加水平(分别占土重的0%和1.2%)和4个残膜含量水平(分别占土重的0%、0.04%、0.08%和0.12%),分析不同土壤条件下的湿润锋运移、入渗时长、累积入渗量、入渗总量和入渗速率。结果表明:秸秆和塑料残膜共同掺入增强了残膜对湿润锋垂直运移的阻滞作用,残膜含量为0.08%时二者共存对湿润锋运移的阻滞作用最强;土壤中残膜含量低于0.08%时,掺入秸秆可显著降低累积入渗量和初始入渗速率($P<0.05$),土壤中残膜含量为0.12%时,掺入秸秆可使累积入渗量和初始入渗速率显著提升($P<0.05$);Kostiakov模型和Philip模型拟合的决定系数 R^2 均接近1,拟合效果较好。综上,土壤中塑料残膜低含量时秸秆会降低入渗能力,而塑料残膜含量较高时秸秆能减轻塑料残膜对入渗的负面影响,Kostiakov模型和Philip模型对研究黄土高原地区秸秆和塑料残膜共存条件下土壤水分入渗过程模拟具有较强的适用性。

关键词:水分入渗;秸秆;残膜;Kostiakov模型;Philip模型;黄土高原

中图分类号:S152.7 **文献标志码:**A

Effects of straw and plastic residue film on soil water infiltration in farmland

YU Xiaoling^{1,2,3}, BAI Chenyun⁴, LIU Qi^{1,2,3}, HAN Xiaoyang^{1,4}, QIAO Jiangbo^{1,4}, ZHU Yuanjun^{1,2,3,4}

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In the dryland farmlands of the Loess Plateau, residual straw and plastic film commonly coexist. This study was conducted to investigate their effects on soil water infiltration. A total of 8 treatments were set up, including 2 levels of straw addition (0% and 1.2% of soil weight) and 4 levels of plastic film content (0%, 0.04%, 0.08%, and 0.12% of soil weight), to analyze the movement of wetting front, infiltration time, cumulative infiltration, total infiltration, and infiltration rate under different soil additive conditions. The results showed that the mixture of straw and plastic residue enhanced the blocking effect of residual film on the vertical migration of wet front, and the coexistence of residual film content was the strongest when the residual film content was 0.08%. When the residual film content in soil was lower than 0.08%, the cumulative infiltration and initial infiltration rate were significantly reduced by straw incorporation ($P<0.05$). When the residual film content in soil was 0.12%, the cumulative infiltration and initial infiltration rate were significantly increased by straw incorporation ($P<0.05$). The determination coefficient R^2 of Kostiakov model and Philip model is close to 1, and the fitting effect is good. In summa-

ry, when the plastic film residue content in the soil is low, straw reduces the infiltration capacity. However, when the plastic film residue content is high, straw helps mitigate the negative impact of plastic residue on infiltration. Both the Kostikov and Philip models demonstrated a good fit to the infiltration data from soils containing straw and plastic film residue in the Loess Plateau.

Keywords: water infiltration; straw; plastic film residual; Kostikov model; Philip model; Loess Plateau region

土壤入渗是水分进入土壤的过程^[1],其形成的土壤水是干旱半干旱地区植物用水的主要来源,决定植被生长、演替和作物产量^[2]。黄土高原地处干旱半干旱地区,降水不足且分布不均,但黄土入渗性能好,是容纳降水的天然水库。黄土中保持的水分被形象称为“土壤水库”,对作物生长和产量稳定起着重要作用^[3]。土壤入渗特征决定着土壤中水分含量和分布,揭示外界因素影响下黄土高原农田土壤水分入渗规律,有助于深入理解区域农田土壤水分分布与有效性,对提高土壤水分利用效率、维持粮食产量稳定具有重要意义。

秸秆作为农业生产过程中的主要副产物,数量巨大、种类繁多且分布广泛^[4]。秸秆还田作为一种有效的农业管理措施,通过增加土壤表面的覆盖层减少水分蒸发,同时由于其分解产生的有机质能够改善土壤结构,改善土壤蓄水持水能力^[5-9]。在我国旱作农业区,因土壤质量不断退化,普遍将作物秸秆就地还田以提高农田土壤肥力^[10-12]。尽管秸秆还田带来了诸多益处,但相关研究表明,秸秆并不能在土壤中完全分解,部分植物残体会选择性的残留在土壤中,这些残留物可能对土壤的长期动态变化及作物生长产生复杂且深远的影响^[13]。农业地膜覆盖作为一种提高作物产量的重要耕作技术,因其可以保持土壤水分、土壤温度和养分,为作物生长提供适宜的环境条件,低成本、耐用且可以避免杂草除草剂的使用等优点在作物生产实践中广受青睐^[14-17]。然而,塑料地膜由于力学性能差,大量农膜在老化作用(耕作、环境风化、空气氧化、生物降解等)下变为残膜,残膜在经日晒和耕作后破裂为回收难度大且成本高的碎片,目前土壤中残膜数量高达 $72 \sim 260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,且主要富集于农田 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 耕层土壤^[18-20]。综上所述,农田中秸秆与残膜连年输入,导致塑料残膜与作物残体共存成为普遍现象^[21-22]。

现阶段聚焦于秸秆和塑料残膜影响土壤水力特性的研究已取得一些进展,如秸秆对土壤入渗影响的研究发现棒状秸秆和丝状秸秆在深埋条件下可以提高土壤水入渗率,而段状秸秆则显著降低土

壤水入渗率,秸秆破碎程度越高,其对土壤水分保持能力的影响越大^[23]。研究还发现,秋季耕作结合秸秆还田能够降低土壤容重,增加土壤孔隙度、大孔隙度和毛管孔隙度,从而改善黄土高原地区土壤物理质量^[24]。齐江涛等^[25]探究了秸秆混埋深度、秸秆混埋量、秸秆长度对土壤水分入渗性能的影响,发现三个因素对渗水量的影响程度表现为秸秆混埋深度>秸秆长度>秸秆混埋量。上述研究说明,秸秆对土壤入渗的影响与其填埋深度和含量以及深度有关,秸秆可以改善土壤的物理性质从而改善土壤的入渗性能。刘子涵等^[26]通过室内土柱试验,设置不同的残膜-微塑料比例,模拟不同的残膜破碎程度,研究了不同破碎程度对湿润锋运移和累积入渗量的影响,发现湿润锋运移速率和累积入渗量随着残膜-微塑料破碎程度的增加而增大。王志超等^[27]发现残膜的类型和丰度不同,对土壤水分入渗和蒸发的影响也存在显著差异。上述研究说明,塑料残膜碎片对土壤入渗的湿润峰和土壤入渗能力有显著影响,其存在降低了土壤的入渗能力,改变了土壤水分分布,并增加了土壤水分运动的不确定性。可见,秸秆与塑料残膜对土壤水文过程影响深刻,然而秸秆与塑料残膜共存对土壤水分入渗的综合影响仍不明确,特别是在黄土高原典型的旱作农业区。

基于此,本研究设置不同含量梯度的秸秆和塑料残膜开展室内土柱入渗试验,分析其对黄土塬区农田土壤水分入渗的影响,为农田土壤水分管理提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料及装置

于 2023 年 6 月采集中国科学院长武黄土高原生态农业试验站($107^{\circ}41'E, 35^{\circ}14'N$)农田 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 耕层土壤,该土壤属粉砂质黏土。剔除根系、石块等杂质后于室内自然风干,过 2 mm 筛备用。供试土壤 pH 8.4;有机质含量 $14.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;全氮含量 $0.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;黏粒、粉粒、砂粒含量分别为 26.77%、64.34%、8.89%。供试塑料残膜为使用时间 1 a 的农

田残膜,将残膜清洗并在烘箱 45℃ 下干燥 24 h,裁剪为边长约 3 mm 的碎片备用。供试秸秆为春玉米上一季收获后所留整株秸秆(不含穗),在 75℃ 下烘干至恒重,用粉样机将秸秆粉碎至 1~2 mm 备用。

试验装置由土柱和供水系统两部分组成。土柱采用内径 20 cm、高 60 cm、外壁带有刻度线的透明有机玻璃柱装填土样制成,顶部设有供水口,底部固定法兰式透气底板。采用内径 20 cm 的马氏瓶定水头供水,出水口设有阀门,试验用水为蒸馏水。马氏瓶和土柱均标有外刻度,用于读取入渗水量和湿润锋(以 cm 为单位)。

1.2 试验设计与方法

试验于 2023 年 7 月在中国科学院长武农业生态试验站进行。微塑料和秸秆的添加量根据先前类似研究文献调研和我国西北地区的平均残膜残留量 $72\sim 231\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[28-29] 和近年来的秸秆还田量 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[30],换算成残膜和秸秆的质量占容重为 $1.3\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的农田土壤 0~20 cm 土层深度总质量的比重。微塑料添加量设置 4 个水平,即添加总量分别占土重的 0%、0.04%、0.08% 和 0.12%,作物残体添加量设置两个水平,即添加总量分别占土重的 0% 和 1.2%(分别模拟不还田和全量还田),采用完全随机方案设计,共计 8 个处理(表 1),每个处理重复 3 次,共 24 个试验土柱,分 8 批进行试验,每 3 个土柱同时进行入渗试验以保证试验条件的一致性。

使用酒精燃烧法计算土样含水率,结合土柱体积和土壤容重计算并称量所需土样;通过喷壶均匀洒水,控制土柱入渗试验开始前土壤含水量为 10%。装填前,在内壁均匀涂抹适量凡士林以防止边壁效应,并在底部放置透水纱布以防止土壤漏出;装填时,每 5 cm 一层分层均匀填充玻璃柱,将每层土样的上表面刷毛,以保证土层之间接触紧密,防止土层边界突变,消除土壤不连续性,影响水分运移。土柱装填总高度控制为 45 cm,其中上部 20 cm 高度范围内按照比例添加秸秆和微塑料,并充分混合均匀,下部 25 cm 范围内不添加秸秆和微塑料。将马氏瓶置于水平位置,用橡胶软管连接有机玻璃柱进水孔与马氏瓶出水口,控制水头高度为 5 cm;水头稳定后,用秒表开始计时并记录,前 3 min 每 30 s、3~9 min 每 1 min、9~21 min 每 2 min、21~51 min 每 5 min、之后每 10 min 观测并记录一次土柱湿润锋移动距离和马氏瓶液面高度。试验从开始到土柱底部均匀渗水截止;当土柱底部均匀渗水时,关闭马氏瓶供水阀门,停止供水。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	塑料地膜占土壤干重 的质量分数/% Mass fraction of plastic film in the soil's dry weight	秸秆占土壤干重 的质量分数/% Mass fraction of straw in the soil's dry weight
CK	0.00	0.0
P ₁	0.04	0.0
P ₂	0.08	0.0
P ₃	0.12	0.0
S	0.00	1.2
P ₁ +S	0.04	1.2
P ₂ +S	0.08	1.2
P ₃ +S	0.12	1.2

1.3 入渗模型与评价指标

为进一步研究不同丰度塑料残膜与秸秆添加对土壤水分入渗的影响,选择 Kostiakov 模型和 Philip 入渗模型进行不同处理土壤水分入渗过程模拟,并进行拟合检验,从而得出适用于秸秆和塑料残膜共存土壤最优入渗模型,以此说明不同添加量塑料残膜与秸秆土壤水分入渗速率随时间的变化过程。

1.3.1 入渗模型

(1) Kostiakov 模型^[31]

$$I = Kt^\alpha \tag{1}$$

式中, I 为累积入渗量(cm); K 和 α 为拟合参数; t 为入渗时间(min)。

(2) Philip 入渗模型^[32]

$$I = St^{0.5} + Ct \tag{2}$$

式中, S 为土壤吸渗率($\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$); C 为稳定入渗率($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)。

1.3.2 评价指标 采用均方根误差 $RMSE$ 、整群剩余系数 CRM 和效率系数 CE 作为评价模型模拟效果的指标。各计算式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{mi} - y_{pi})^2} \tag{3}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n y_{pi} - \sum_{i=1}^n y_{mi}}{\sum_{i=1}^n y_{pi}} \tag{4}$$

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{mi} - y_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{pi} - \bar{y})^2} \tag{5}$$

式中, n 为实测值与模型模拟值的个数; y_{pi} 为实测值; y_{mi} 为模型模拟值; $\bar{y}$ 为实测值 y_{pi} 的平均值。 $RMSE$ 、 CRM 、 CE 的最佳值分别是 0、0、1,越趋近于最佳值,说明模型拟合效率越高,反之,模型模拟效果越差。

1.4 数据处理与分析

本研究采用 Excel 2021 进行数据处理,使用 SPSS 17.0 进行统计分析,采用单因素方差分析研究不同秸秆和塑料残膜含量土壤入渗过程的差异,并采用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平为 $P<0.05$;用 Python 进行模型拟合检验。

2 结果与分析

2.1 掺混塑料残膜与秸秆对湿润锋运移和入渗时长的影响

各处理湿润锋随入渗时间的动态变化过程如图 1 所示,各处理的湿润锋运移曲线与 CK 几乎重合,随入渗进行逐渐显示出差异性。当入渗时间为 60 min 时, P_1 、 P_2 、 P_3 处理湿润锋运移距离较 CK 分别减少 8.33%、8.33%、11.74%,随着塑料残膜含量的增加湿润锋运移距离越来越小, P_1+S 、 P_2+S 、 P_3+S 处理湿润锋运移距离较 CK 显著减少 ($P<0.05$),分别减少 41.67%、45.83%、35.61%,随着塑料残膜含量增大,相同入渗时间对应的湿润锋距离呈现先减小后增大的趋势,但仍低于 CK 和 S 处理。当入渗时间为 60 min 时,秸秆处理方式不同,塑料残膜含量相同条件下的湿润锋距离呈现以下特征: S 较 CK 处理减少 18.18%, P_1+S 较 P_1 处理减少 36.36%, P_2+S 较 P_2 处理减少 40.91%, P_3+S 较 P_3 处理减少 27.04%。综上所述,秸秆和塑料残膜共存进一步减缓了湿润锋运移距离速率,当塑料残膜含量占土重比为 0.08% 时,二者共存对湿润锋运移的阻滞作用最强。

图 2(见 103 页)为不同塑料地膜输入量与秸秆添加条件下的入渗时长, P_1 与 CK 处理入渗时长相同, P_2 和 P_3 处理入渗时长与 CK 相比分别增加 16.57% 和 22.10%,说明对于仅含塑料残膜不含秸秆

处理的土壤,随着塑料残膜丰度的增大,整个入渗经历的时间显著增加 ($P<0.05$),湿润锋到达土柱底部所需的时长增大。S 与 CK 相比入渗时长增加 27.62%,说明添加秸秆增加了入渗时长。与 CK 相比, P_1+S 、 P_2+S 和 P_3+S 处理的入渗时长分别增加了 82.87%、110.5% 和 55.25%。与 S 相比, P_1+S 、 P_2+S 和 P_3+S 处理的入渗时长分别增加了 43.29%、64.94% 和 21.65%,说明秸秆和塑料残膜共存显著延长了入渗时长 ($P<0.05$),且入渗时长随塑料残膜丰度的增加呈现先增加后减少的趋势。

2.2 掺混秸秆和塑料残膜对累积入渗量、入渗总量和入渗速率的影响

不同丰度塑料残膜与秸秆各处理土壤累积入渗如图 3 所示。入渗初期,各处理的累积入渗量变化没有显著差异,其变化趋势与湿润锋类似。入渗时间为 100 min 时,仅含塑料残膜处理的累积入渗量表现为 $P_1>CK>P_2>P_3$,含秸秆处理的累积入渗量表现为 $P_1+S<P_2+S<S<P_3+S$,且在此之后均呈相同趋势。入渗结束时,CK、 P_1 、 P_2 、 P_3 、S、 P_1S 、 P_2S 、 P_3S 处理累积入渗量分别为 14.00、14.80、14.45、14.15、18.90、14.80、15.50、22.50 cm。仅掺入塑料残膜处理的累积入渗量在入渗相对稳定后随着残膜含量的增加而逐渐减少。对于秸秆和塑料残膜共同掺入的处理,随着残膜含量的增加,其累积入渗量显著低于未掺秸秆处理,但当残膜含量为 0.12% 时,其累积入渗量又显著高于其他处理 ($P<0.05$)。

不同丰度塑料残膜与秸秆添加条件下的入渗总量如图 4 所示。入渗结束时, S 处理入渗总量显著高于 CK ($P<0.05$),增加了 35.00%。仅掺入塑料残膜的土壤累积入渗量随着残膜含量的增加而逐渐减少。对于秸秆和塑料残膜共存的土壤,其入渗总量随着塑料残膜含量的增加而增加;随着塑料残

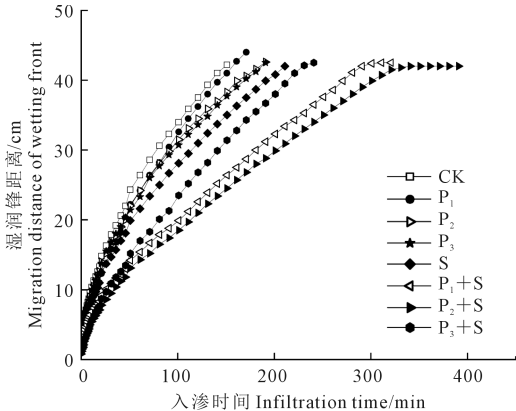


图 1 各处理湿润锋随入渗时间的动态变化过程
Fig.1 Variation of wetting front with infiltration time for different treatments

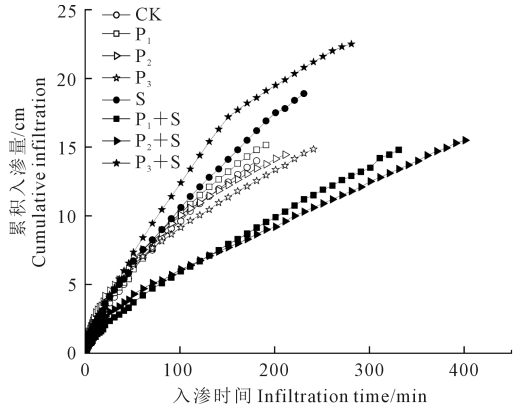


图 3 不同处理累积入渗量变化
Fig.3 Changes of cumulative infiltration for different treatments

膜占土重的比例达到 0.08%后,秸秆掺入使得土壤的入渗总量显著增加($P<0.05$)。

图 5 为各处理的初始入渗速率(入渗前 3 min)、稳定入渗速率(入渗后 60 min)和平均入渗速率情况。可知仅添加秸秆可以增加入渗速率,但效果不显著;添加秸秆使得初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率较 CK 分别增加 3.80%、8.80%、5.80%。塑料残膜含量较低时,与秸秆同时掺入显著减缓了初始入渗速率和平均入渗速率($P<0.05$),但当塑料残膜含量为 0.12%时,入渗速率与 CK 相比无显著变化。

2.3 塑料残膜与秸秆掺入条件下的入渗模型分析

由表 2 可知,对于仅含塑料残膜的处理,各处理的决定系数 $R^2=0.986\sim0.999$,Kostiakov 模型 $RMSE$

均较低(0.109~0.292), CRM 均接近于 0,表明模型拟合度较高。Philip 模型除了 P_3+S 处理的 $RMSE$ 高达 0.977 外,其余处理组均方根误差均较低,介于 0.098~0.379,各处理 CRM 接近于 0。

对于同时掺入秸秆和塑料残膜的土壤,两种模型 R^2 均接近于 1,但相较于仅含塑料残膜的处理,在同等塑料残膜含量下,秸秆和塑料残膜共存土壤的决定系数略小,且随着塑料残膜丰度的增加,秸秆和塑料残膜共存土壤的 R^2 逐渐减小, $RMSE$ 逐渐增大,表明两种模型对各处理的预测误差有所增大,但对于残膜含量低于 0.12%且秸秆含量低于1.2%的处理仍保持较高的拟合度。

秸秆和塑料残膜共存对模型参数的影响(图 6、7)表明,对于仅添加塑料残膜的土壤,随着塑料残膜

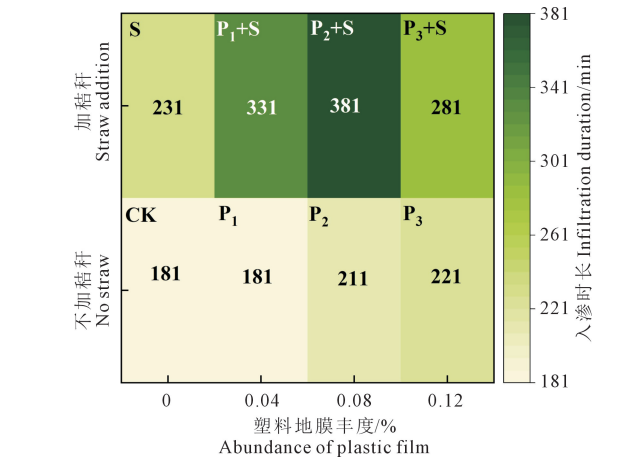


图 2 不同塑料地膜输入量与秸秆添加对入渗时长的影响
Fig.2 Influence of different plastic film input and straw addition on infiltration time

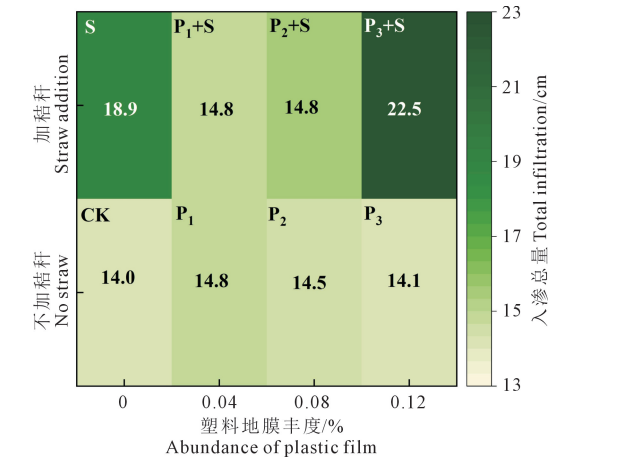
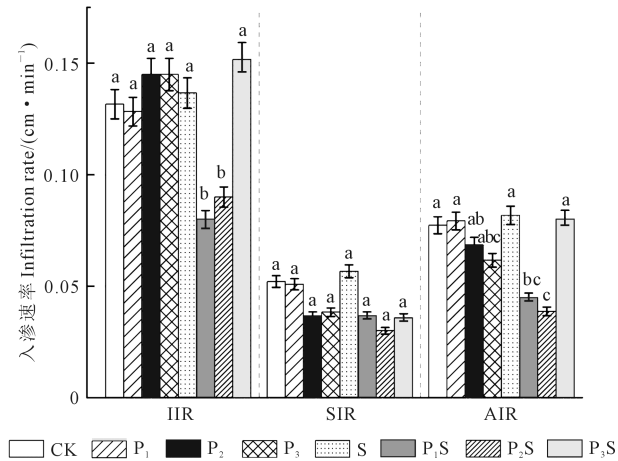


图 4 不同塑料地膜与秸秆添加条件下的入渗总量
Fig.4 Total infiltration under different plastic mulch and straw addition conditions



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.
图 5 各处理的初始入渗速率(IIR)、稳定入渗速率(SIR)和平均入渗速率(AIR)情况
Fig.5 Initial infiltration rate, stable infiltration rate and average infiltration rate of each treatment

丰度的增加,参数 K 呈现先增大后减小的趋势,而参数 α 先减小后增大;参数 S 先增大后减小,参数 C 先减小后增大。在塑料残膜与秸秆共存的土壤中,参数 α 的变化趋势与仅含塑料残膜的情况相似,即先减小后增大,参数 K 则呈现持续增大的趋势;参数 S 随着塑料残膜丰度的增加显著增大,参数 C 先减小后显著增大。

3 讨 论

3.1 添加塑料残膜与秸秆显著降低土壤湿润锋运移速率

土壤入渗是土壤水分运动过程的重要阶段,湿润锋作为湿润土壤与干土层的交界面,随着入渗进行而不断下移,湿润锋的形成是土壤入渗的直接结果。湿润锋的移动速度受多种因素影响,包括土壤质

表 2 各处理条件下的 Kostiakov 模型和 Philip 模型拟合效果

Table 2 Fitting effects of Kostiakov model and Philip model under different treatment conditions

处理 Treatment	Kostiakov						Philip					
	参数 Parameter		RMSE	R ²	CRM	CE	参数 Parameter		RMSE	R ²	CRM	CE
	K	α					S	C				
CK	0.333	0.724	0.2552	0.9969	0.0142	0.9969	0.446	0.048	0.3787	0.9931	0.0208	0.9931
P ₁	0.437	0.679	0.1782	0.9986	-0.0043	0.9986	0.574	0.041	0.2030	0.9982	0.0029	0.9982
P ₂	0.747	0.557	0.1455	0.9990	0.0024	0.9990	0.843	0.012	0.1999	0.9981	0.0073	0.9981
P ₃	0.600	0.586	0.2141	0.9980	0.0075	0.9980	0.726	0.016	0.2985	0.9962	0.0141	0.9962
S	0.408	0.707	0.1423	0.9995	-0.0042	0.9995	0.572	0.046	0.1800	0.9991	0.0031	0.9991
P ₁ S	0.185	0.753	0.1094	0.9995	-0.0034	0.9995	0.298	0.028	0.0982	0.9996	0.0036	0.9996
P ₂ S	0.331	0.636	0.2916	0.9964	-0.0103	0.9964	0.456	0.015	0.1771	0.9987	-0.0060	0.9987
P ₃ S	0.465	0.701	0.7738	0.9909	0.0182	0.9909	0.684	0.047	0.9768	0.9856	0.0252	0.9856

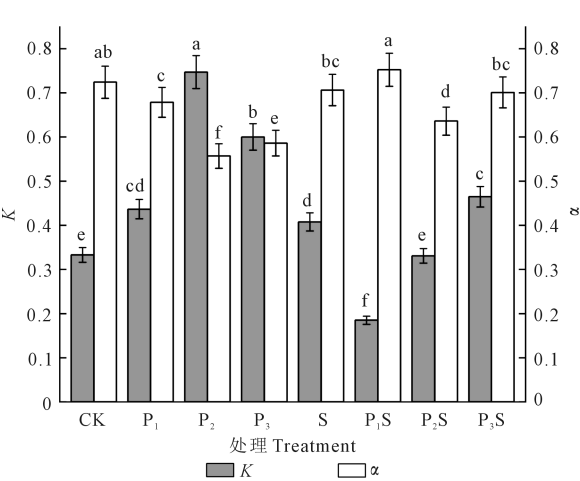


图 6 不同处理对 Kostiakov 模型参数的影响

Fig.6 Effects of different treatments on Kostiakov model parameters

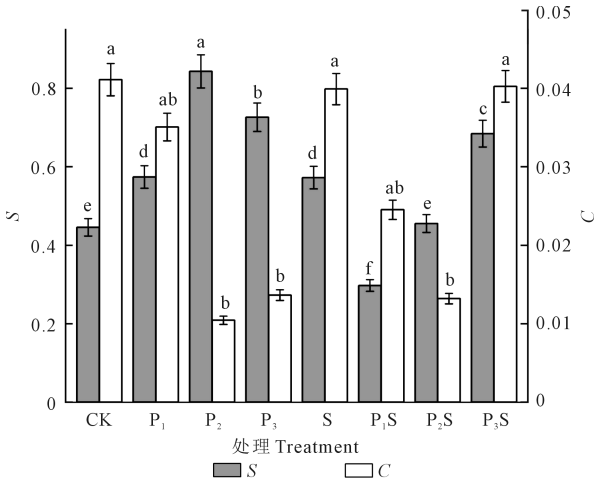


图 7 不同处理对 Philip 模型参数的影响

Fig.7 Effects of different treatments on Philip model parameters

地、结构、有机质含量、土壤湿度等。在湿润锋处，由于土壤含水量梯度大，形成了较大的土壤基质势梯度，从而驱使湿润锋继续向下移动。本研究中秸秆和塑料残膜的添加显著增加了湿润锋运移至土柱底部时的入渗时长 ($P<0.05$)，缩短了同一时刻对应的湿润锋运移距离。对于仅掺入塑料残膜的土壤，基本呈现塑料残膜含量越高则湿润锋运移速率越小的规律，可能的原因在于，塑料残膜在土壤中形成了一层物理屏障，显著改变了土壤的物理性质，这层物理屏障阻碍了土壤水分下渗，导致湿润锋运移速率下降，这一结果与先前的研究相一致，如王志超等^[27]的研究指出，添加 2% 的聚丙烯微塑料可使湿润锋运移速率降低 18%。

不同入渗阶段的湿润锋运移特征也存在显著差异。入渗初期，添加塑料残膜的各处理的湿润锋运移距离和累积入渗量与 CK 相比相差不大，这与刘子涵等^[26]的研究结果一致。可能是由于入渗初期土壤表面干燥，水势梯度大，湿润锋不饱和，导致

各处理垂直入渗速率均较高，无明显差别。入渗进行到 60 min 后，对于同时掺入秸秆和塑料残膜处理的土壤，其湿润锋运移距离显著低于仅掺入塑料残膜的土壤和 CK 处理 ($P<0.05$)，可能是由于秸秆碎屑和塑料残膜同时输入使土壤内比表面积增大，储水能力增强，且玉米秸秆具有亲水性，能够吸收水分膨胀，使得土壤保水能力增强，进而湿润锋运移速率降低。

3.2 添加塑料残膜与秸秆明显影响土壤入渗

土壤入渗直接影响地表径流的形成、土壤水分的补给和地下水的补给。在农业生产中，合理的土壤入渗能力有助于保持土壤湿度、促进植物根系吸水，提高作物产量和品质。同时，它也是水资源管理和水土保持工作的重要依据。本研究表明，仅掺入塑料残膜土壤的累积入渗量随着残膜含量的增加而减少，这可能是因为残膜阻塞土壤孔隙，减少水分入渗的通道，随着残膜含量的增加，这种物理阻塞现象愈发明显，导致水分在土壤的运移受阻，

累积入渗量减少,牛文全等^[32]的研究也证实过这一结论。值得注意的是,秸秆对于累积入渗量的影响还与塑料残膜含量有关,未来将进一步细化塑料残膜含量梯度,探究秸秆与残膜共存条件下,在不同入渗时期中秸秆含量与累积入渗量的关系。

另外,本研究中,除塑料残膜含量为 0.04% 的处理以外,其他处理的结果表明添加秸秆可明显增加入渗总量,这与张凯等^[33]和沈秉涛等^[34]的研究结果相反,与王珍等^[35]的研究结果一致,这可能是因为本研究中所采用的是过 2 mm 筛的玉米秸秆,具有更高的比表面积和更强的吸水特性,而其他研究中的使用是长秸秆,土壤内部孔隙可能被秸秆阻断,导致入渗总量降低。

结合各处理的初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率情况,秸秆和塑料残膜共存对稳定入渗速率影响不显著,而对初始入渗速率有显著影响。这说明当土壤中掺入秸秆对塑料残膜阻滞土壤入渗的影响主要是通过影响入渗达到稳定之前的人渗过程来实现。

入渗模型适宜性分析的结果表明,微塑料和秸秆对 Kostikov 模型和 Philip 模型两种入渗模型参数的影响无显著规律,各处理的 R^2 均接近于 1、 $RMSE$ 均较低、 CRM 接近于零,均能够很好地模塑料地膜和秸秆共存土壤的水分入渗过程。Kostikov 模型中,参数 K 是入渗系数,它与土壤的孔隙率和连通性有关,反映了土壤入渗初期的入渗能力^[36]。对于微塑料与秸秆共存的土壤,随着微塑料丰度的增加, K 值逐渐增大,这说明秸秆和塑料残膜的共同掺入使得水分入渗初期的累积入渗量增大。

4 结 论

1) 秸秆和塑料残膜共同掺入增强了残膜对湿润锋垂直运移产生的阻滞作用,残膜含量为 0.08% 时二者共存对湿润锋运移的阻滞作用最强。

2) 土壤中塑料残膜低含量时秸秆会降低入渗能力,而塑料残膜高含量时秸秆能减轻塑料残膜对入渗的负面影响。

3) Kostikov 模型和 Philip 模型对研究黄土高原地区含秸秆和塑料残膜条件下土壤水分入渗过程模拟具有较强的适用性。

参 考 文 献:

[1] 辛继红, 高红贝, 邵明安. 土壤温度对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 217-220.
XIN J H, GAO H B, SHAO M A. Study of the effect of soil temperature on soil water infiltration[J]. Journal of Soil and Water Conserva-

tion, 2009, 23(3): 217-220.
[2] ZHANG Y Y, ZHAO W Z, LI X B, et al. Contribution of soil macropores to water infiltration across different land use types in a desert-oasis ecoregion[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(4): 1751-1760.
[3] 王晶, 白清俊. 黄土高原生态系统服务价值研究探析[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2020, (2): 63-67, 72.
WANG J, BAI Q J. Exploration into the value of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. Western Development (Research on Land Development Engineering), 2020, (2): 63-67, 72.
[4] 陈理, 赖有春, 陈帅宇, 等. 基于文献计量学的玉米秸秆利用及关键共性技术分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 224-236.
CHEN L, LAI Y C, CHEN S Y, et al. Analysis of the key generic technologies for the utilization of maize stovers based on bibliometrics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(12): 224-236.
[5] ZHANG P, WEI T, LI Y L, et al. Effects of straw incorporation on the stratification of the soil organic C, total N and C : N ratio in a semiarid region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 28-35.
[6] 肖俊瑶, 许龄井, 王馨仪, 等. 秸秆源有机物料长期还田对土壤水分动态及孔隙结构的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(9): 2729-2736.
XIAO J Y, XU L J, WANG X Y, et al. Effects of long-term straw-derived organic materials returning on soil water dynamics and pore structure[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(9): 2729-2736.
[7] CAO J S, LIU C M, ZHANG W J, et al. Effect of integrating straw into agricultural soils on soil infiltration and evaporation[J]. Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2012, 65(12): 2213-2218.
[8] WANG X Y, YANG K, ZHENG J. Effect of straw addition on soil infiltration characteristics and model-fitting analysis[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(13): 395.
[9] WANG C G, MA J Y, WANG Y X, et al. The influence of wheat straw mulching and straw length on infiltration, runoff and soil loss[J]. Hydrological Processes, 2022, 36(4): e14561.
[10] ZHAO H L, JIANG Y H, NING P, et al. Effect of different straw return modes on soil bacterial community, enzyme activities and organic carbon fractions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2019, 83(3): 638-648.
[11] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 528-540.
WANG J K, XU Y D, DING F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: a review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 528-540.
[12] ZHANG H Y, HOBBI E A, FENG P Y, et al. Responses of soil organic carbon and crop yields to 33-year mineral fertilizer and straw additions under different tillage systems[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104943.
[13] LI X, ZHU W, XU F, et al. Organic amendments affect soil organic carbon sequestration and fractions in fields with long-term contrasting nitrogen applications[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 322: 107643.
[14] MENG X, ZHANG X, LI Y, et al. Nitrogen fertilizer builds soil or-

ganic carbon under straw return mainly via microbial necromass formation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024,188: 109223.

[15] SALAMA K, GEYER M. Plastic mulch films in agriculture: their use, environmental problems, recycling and alternatives[J]. Environments, 2023, 10(10): 179.

[16] VOX G, LOISI R V, BLANCO I, et al. Mapping of agriculture plastic waste [J]. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 2016, 8: 583-591.

[17] PREM M, RANJAN P, SETH N, et al. Mulching techniques to conserve the soil water and advance the crop production-a review[J]. Current World Environment, 2020, 15: 10-30.

[18] BRODHAGEN M, GOLDBERGER J R, HAYES D G, et al. Policy considerations for limiting unintended residual plastic in agricultural soils[J]. Environmental Science & Policy, 2017, 69: 81-84.

[19] TIAN L L, JINJIN C, JI R, et al. Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate[J]. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2022, 25: 100311.

[20] ZHANG D, NG E L, HU W L, et al. Plastic pollution in croplands threatens long-term food security[J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3356-3367.

[21] XIAO M L, SHAHBAZ M, LIANG Y, et al. Effect of microplastics on organic matter decomposition in paddy soil amended with crop residues and labile C:a three-source-partitioning study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 126221.

[22] YU H, ZHANG Z, ZHANG Y, et al. Effects of microplastics on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in the context of straw incorporation:a comparison with different types of soil[J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117733.

[23] YAO M Z, LI B, FENG X, et al. Effects of straw size in buried straw layers on water movement in adjacent soil layers [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2016, 9(2): 74-84.

[24] FAN Y C, YUAN Y, LI T, et al. Effects of autumn tillage with straw return on soil physical characteristics of corn fields in the eastern loess plateau [J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1362616.

[25] 齐江涛, 田辛亮, 刘凯, 等. 黑土区覆混耕作中玉米秸秆还田对土壤水分入渗性能的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 141-147.

QI J T, TIAN X L, LIU K, et al. Soil water infiltration under mulch tillage affected by maize stovers returning in black soil areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 141-147.

[26] 刘子涵, 才璐, 赵小丽, 等. 聚乙烯残膜破碎过程对土壤水分入渗的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(12): 5768-5774.

LIU Z H, CAI L, ZHAO X L, et al. Effect of decomposition of polyethylene residue film on soil water infiltration [J]. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5768-5774.

[27] 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 等. 微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4394-4401.

WANG Z C, ZHANG B W, NI J X, et al. Effect of microplastics on soil water infiltration and evaporation [J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4394-4401.

[28] 杨圆圆, 刘梦龙, 赵伟, 等. 渭北旱塬春玉米地膜残留特点研究[J]. 陕西农业科学, 2016, 62(1): 4-6, 9.

YANG Y Y, LIU M L, ZHAO W, et al. Study on the characteristics of residual plastic film on spring corn in Weibei arid plateau [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2016, 62(1): 4-6, 9.

[29] 薛颖昊, 曹肆林, 徐志宇, 等. 地膜残留污染防治技术现状及发展趋势[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1595-1600.

XUE Y H, CAO S L, XU Z Y, et al. Status and trends in application of technology to prevent plastic film residual pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8): 1595-1600.

[30] 刘聪慧. 玉米秸秆与聚乙烯残膜共存对土壤有机碳固持的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

LIU C H. The effect of coexistence of corn stover and polyethylene residue film on soil organic carbon sequestration [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.

[31] 刘子涵, 才璐, 董勤各, 等. PE 微塑料对土壤水分入渗的影响及入渗模型适宜性评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1795-1802.

LIU Z H, CAI L, DONG Q G, et al. Effect of PE microplastics on soil water infiltration and suitability evaluation of infiltration model [J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1795-1802.

[32] 牛文全, 邹小阳, 刘晶晶, 等. 残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 110-119.

NIU W Q, ZOU X Y, LIU J J, et al. The impact and uncertainty analysis of residual film on soil moisture infiltration and evaporation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 110-119.

[33] 张凯, 宰松梅, 仵峰, 等. 小麦玉米秸秆还田对土壤水分入渗的影响[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(9): 35-42.

ZHANG K, ZAI S M, WU F, et al. Effects of returning wheat or corn straw on soil water infiltration[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(9): 35-42.

[34] 沈秉涛, 王妍, 刘云根, 等. 秸秆混掺对石漠化地区土壤水氮分布的影响[J]. 节水灌溉, 2023, (6): 66-75, 82.

SHEN B T, WANG Y, LIU Y G, et al. Effect of straw blending on the distribution of water and nitrogen in soils of rocky desertification areas[J]. Water Saving Irrigation, 2023, (6): 66-75, 82.

[35] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 75-80.

WANG Z, FENG H. Effect of straw-incorporation on soil infiltration characteristics and soil water holding capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 75-80.

[36] 肖庆礼, 黄明斌, 邵明安, 等. 黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入渗与再分布[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 124-131.

XIAO Q L, HUANG M B, SHAO M A, et al. Infiltration and drainage processes of different textural soil moisture in middle reaches of Heihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 124-131.