微塑料种类和尺寸对碳酸盐岩红土入渗过程及水力参数的影响

陆丽霞[1], 陈 浩[1], 王儒章[1], 唐俊杰[1], 杨世梅[1], 刘冬冬[1,2]

(1.贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550000;
2.喀斯特地质资源与地质环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550000)

摘　要:[目的] 探究微塑料种类和尺寸对碳酸盐岩红土入渗过程的影响,为进一步揭示微塑料污染农田土壤的水文过程提供新的数据支撑。[方法] 通过室内扁平土柱入渗模拟试验,采用定水头垂直入渗方法,研究了不同粒径(550,150 和 50 μm)的聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)微塑料对红土入渗速率、累积入渗量和湿润锋深度的影响,同时评价累积入渗模型、Philip 模型、Horton 模型和 Kostiakov 模型在入渗过程中的适用性,再利用 Hydrus-1D 模型反演了不同微塑料处理下的 5 项水力参数〔残余含水量(θ_r),饱和含水量(θ_s),拟合参数(α),经验参数(n),土壤饱和导水率(K_s)〕。[结果] ①随着粒径的减小,PS 微塑料的入渗速率、累积入渗量增大,而 PE 和 PP 微塑料的累积入渗量、入渗速率随粒径的增大先增大后减小,且不同粒径的累积入渗量差异显著($p<0.05$);PS 微塑料对水分的运移先促进后抑制,而 PP 与 PE 都起到促进水分运移的作用。②所有模型均适用于含微塑料红土的入渗模拟,其中 Horton 模型和累积入渗模型表现最佳〔决定系数(R^2),效率系数(CE)>0.98〕。③不同微塑料处理对土壤水力参数(θ_r,θ_s,α,n,K_s)的影响不显著,但 PS 微塑料饱和导水率随粒径的减小而增加。[结论] PS,PP,PE 微塑料对土壤入渗过程的影响存在明显差异,Horton 模型、累积入渗模型以及 Hydrus-1D 模型均表现出较高的适用性。

关键词: 碳酸盐岩红土; 水分入渗; 微塑料; 模型拟合; Hydrus-1D 模型

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2025)01-0215-10　　**中图分类号:** S152.7, X53

文献参数: 陆丽霞, 陈浩, 王儒章, 等.微塑料种类和尺寸对碳酸盐岩红土入渗过程及水力参数的影响[J].水土保持通报,2025,45(1):215-224. Lu Lixia, Chen Hao, Wang Ruzhang, et al. Influence of microplastic species and size on infiltration process and hydraulic parameters of carbonate lateritic soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):215-224. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.023; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.023.

Influence of microplastic species and size on infiltration process and hydraulic parameters of carbonate lateritic soils

Lu Lixia[1], Chen Hao[1], Wang Ruzhang[1], Tang Junjie[1], Yang Shimei[1], Liu Dongdong[1,2]

(1.*Colleage of Resource and Environment Engineering*, *Guizhou University*, *Guiyang*, *Guizhou* 550000, *China*; 2.*Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment*, *Ministry of Education*, *Guiyang*, *Guizhou* 550000, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of microplastic type and size on the infiltration process of carbonatite laterite soils was investigated in order to provide new data revealing the hydrological processes of microplastic-contaminated agricultural soils. [Methods] The effects of polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) microplastics with different particle sizes (550, 150, and 50 μm) on the infiltration rate, cumulative infiltration, and the depth of the wetting front of the lateritic soil were investigated by an indoor simulation of infiltration into a flattened soil column using a fixed-head vertical

收稿日期: 2024-06-18　　**修回日期:** 2024-10-19　　**采用日期:** 2024-10-21

资助项目: 国家自然科学基金地区基金项目"孔/裂隙水驱动下垦殖坝地土壤—表层岩溶带氮肥的快速流失机制"(42067004); 贵州省优秀青年人才项目(黔科合平台人才-YQK[2023]005)。

第一作者: 陆丽霞(2001—),女(汉族),贵州省盘州市人,硕士研究生,研究方向为岩溶区生态水文过程。Email:gs.lulx23@gzu.edu.cn。

通信作者: 刘冬冬(1989—),男(汉族),江苏省盐城市建湖县人,博士,教授,博士研究生导师,主要从事地球关键带水土过程及生态环境效应研究。Email:liudongdongcn@foxmail.com。

infiltration method. The effects of the cumulative infiltration, Philip, Horton, and Kostiakov models on the infiltration rate of the lateritic soil, cumulative infiltration, and the depth of the wetting front were also evaluated. The five hydraulic parameters (θ_r, θ_s, α, n, K_s) were inverted under different microplastic treatments using the Hydrus-1D model. [Results] ① The infiltration rate and cumulative infiltration of PS microplastics increased with decreasing particle size, while the cumulative infiltration and infiltration rate of PE and PP microplastics increased and then decreased with increasing particle size, and the differences in cumulative infiltration between different particle sizes were significant ($p < 0.05$); PS microplastics facilitated and then inhibited water transport, while both PP and PE played the role of facilitating water transport. ② All models were applicable to the infiltration simulation of microplastic-containing laterite soils, with Horton's model and the cumulative infiltration model performing the best (R^2, CE > 0.98). ③ The effect of microplastic treatment on soil hydraulic parameters (θ_r, θ_s, α, n, K_s) was insignificant, but the PS microplastic saturated hydraulic conductivity showed an increase with decreasing particle size. [Conclusion] The effects of PS, PP, and PE microplastics on soil infiltration processes were significantly different, and the Horton, cumulative infiltration, and Hydrus-1D models showed high applicability.

Keywords: carbonate lateritic soils; water infiltration; microplastics; model fitting; Hydrus-1D model

微塑料,通常指直径小于5 mm的塑料颗粒和纤维等合成化合物,广泛分布于大气圈、水圈、土壤圈等环境中,已成为各领域关注的焦点[1]。微塑料因其具有高分子量、高疏水性以及强化学稳定性的特点,而表现出极强的抗降解性。尽管在自然环境条件下塑料会逐渐分解为较细小的碎片,但随着其体积的减小,导致了比表面积的增大,微塑料对各种污染物的吸附能力也随之增强,成为了土壤环境中污染物传播的重要媒介[2]。土壤中的微塑料主要来源于农用地膜残留物、农用灌溉污水、填埋的塑料垃圾渗流以及塑料制品废弃物等[3]。其中农用地膜对土壤环境和农业发展的具有诸多好处,而被广泛使用,但由于地膜的高使用率和低回收率,大量农用地膜材料〔如聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)微塑料〕残留在土壤中[4]。同时,聚苯乙烯作为主要成分的温室大棚材料和土壤调节剂被大量使用,也导致其成为了农田土壤中微塑料的直接来源,因此,聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)聚苯乙烯(PS)微塑料都是当前土壤生态系统中常见的塑料污染物[5]。微塑料颗粒在土壤中的积累显著影响其物理和化学特性,降低透气性和含水量,破坏土壤结构,导致干裂和退化。同时,还会提高土壤碳氮比,干扰养分循环,并吸附重金属等有害物质,加剧污染[6-7]。

土壤水文过程作为陆地生态系统水循环的重要组成部分,正确表征其水力特性至关重要。土壤入渗作为土壤水文过程的关键参数与地表径流和土壤侵蚀密切相关[8]。Li Yuanqiao等[9]通过室内模拟灌溉试验,指出塑料残留物会阻碍湿润峰的运移。王志超等[10]通过室内土柱入渗试验,发现微塑料丰度越大,相同入渗时间内土壤湿润锋运移距离越小。张博文等[11]研究发现,随着微塑料丰度增大,累积入渗时间显著增加,湿润峰运移距离和累积蒸发量均减小。张彦等[12]通过对不同浓度、类型和粒径大小的微塑料开展盆栽试验,发现粒径大小对小麦生长的影响最大。目前,关于农膜残留、覆盖物类型和土壤含盐量对土壤入渗和蒸发影响的研究相对深入[13]。然而,微塑料在复杂土壤环境中的迁移行为及其机制尚未充分明确,且缺乏对不同土壤类型中微塑料迁移特性和模型化模拟的系统研究[14]。尽管农田生态系统中微塑料的研究多集中于其空间分布和赋存特征,但对于微塑料如何影响土壤水分入渗的定量研究较少,目前仅定性地确认了微塑料对土壤水分运移的阻碍作用[15]。因此,为了全面理解微塑料对土壤入渗性能的具体影响及其变化规律,有必要结合具体土壤类型,开展更深入的探讨和研究。基于上述研究的不足,本文采用室内模拟土柱入渗试验,展开不同微塑料处理条件下的土壤水分入渗能力的研究,旨在探究不同种类及粒径的微塑料对土壤水分入渗过程的影响机制,评估4种主流入渗模型在微塑料污染土壤条件下的适用性和准确性,以及通过Hydrus-1D模型的反演来为水力参数确定提供数据依据,以期优化参数选择。试验结果不仅为土壤水分运动提供了实证数据支持,而且揭示了微塑料污染对农田土壤水文循环特征的潜在影响,为理解微塑料在土壤水文过程中的作用机理提供了新的视角。

1 材料与方法

1.1 土壤样品

供试土壤样品为碳酸盐岩红土,于2023年4月24日采自云南省红河哈尼族彝族自治州,2023年

4—6 月进行室内模拟试验。取表层土壤除去根系枯枝落叶等杂质后,均匀混合经充分风干后碾压粉碎、过 2 mm 土筛。通过激光粒度仪测量供试土样的机械组成,土壤黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 32.13%,34.77%和 33.10%;土壤质地为粉砂质壤土,测定其初始容重为 1.30 g/cm^3,pH 值为 5.31,土壤电导率(EC)为 91.76 μS/cm,饱和含水率为 40.04%,初始含水率为 14.51%。碳酸盐岩红土是一种特殊的土壤类型,具有黏粒含量高、含水量高、胶体物质丰富、结构致密等物理特征。供试微塑料原料为塑料粉末。

1.2　入渗试验方案

入渗试验装置及试验各处理如图 1 所示,试验采用垂直定水头入渗法模拟土层中存在微塑料的水分入渗过程,探究微塑料类型和粒径大小对碳酸盐岩红土水分入渗的影响机制。入渗的扁平土柱和供水马氏瓶均采用有机玻璃制成,马氏瓶外表贴有刻度尺,以便记录入渗量,马氏瓶直径 6 cm,高 50 cm,试验土柱长 30 cm,宽 2 cm,高 30 cm,每层 3 cm 共分10 层。供水水头固定,以稳压供水。整个试验过程中实验室温度为常温,无外在影响因素。

试验共设置 3 种微塑料种类,3 种微塑料颗粒尺寸和 1 个对照处理,共计 10 组不同处理。每组 2 次重复。在室内进行入渗之前,将自然风干,过筛后的土样与分别与 3 种不同粒径的微塑料(PE, PP, PS,粒径分别为 550,150 和 50 μm)充分均匀混合。由已知土壤容重 1.30 g/cm^3,结合土柱体积计算得出土柱每一层需要的土壤质量为 234.00 g。同时根据已有研究[16],将微塑料颗粒在每一层土壤中的比例设置为 5%,得出混合微塑料的扁平土柱,每一层土壤质量为 222.30 g,微塑料质量为 11.7 g,质量误差范围均控制在±0.1 g 以内。将称量好的土样(若是有微塑料组,须充分搅拌混合)转移至土柱内,每灌装一层后使用压土器对土样进行平整化处理,使每一层土样顶部与刻度线对齐,灌装时用长塑料尺将灌装土样抹匀,并对表面进行刮毛处理。以土柱表面贴有的红色网格线为标准,表面刮毛后再进行下一层灌装,并以此类推直至 10 层土柱装填完毕。土样装填完后在其上表面放一张纱布(30 cm×2 cm),防止供水装置向土柱供水时冲刷破坏表层土壤。土柱装填完毕之后,平稳放置于桌面,马氏瓶中装入足量自来水,连通橡胶管,并轻放于土壤表面,记录初始马氏瓶读数。开启马氏瓶阀门的同时使用 MVS 软件抓拍土柱,设置为每2 min 抓拍 1 次、连续抓拍,便于获得清晰的土壤入渗图像和进行后期相关的分析处理。同时在入渗过程中,每 2 min 读取 1 次马氏瓶读数(与拍摄时间同步),直至湿润锋到达土柱底部,停止记录,关闭马氏瓶阀门,停止相机抓拍,检查文件夹中图像是否抓拍完整,至此完成一次土柱入渗试验。入渗试验结束后,取出土柱内土壤使用烘干法测定土壤饱和含水率。

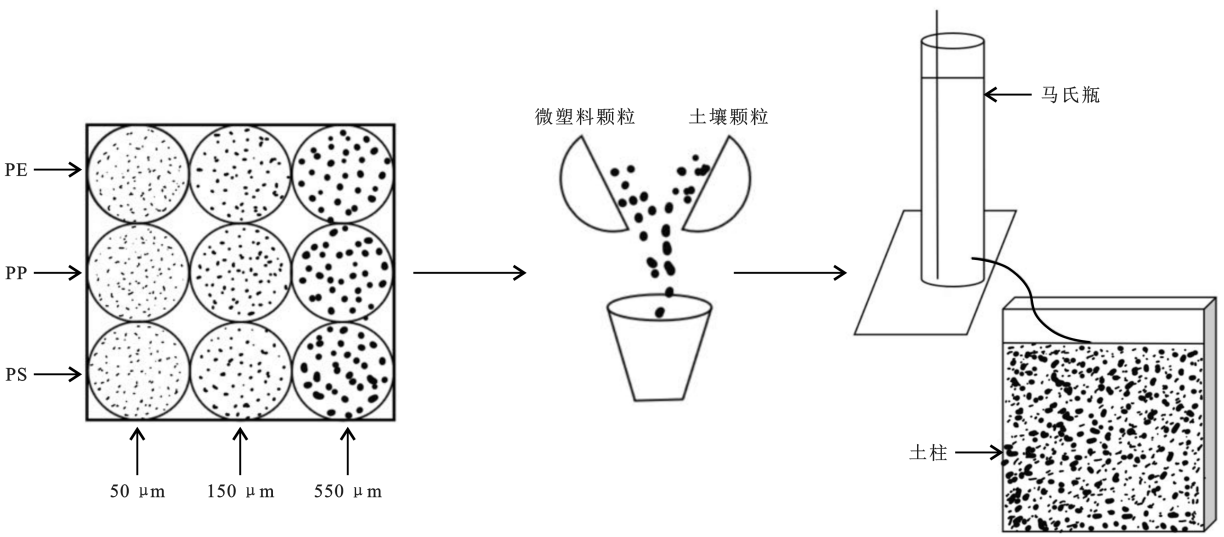

图 1　微塑料的 9 种处理及入渗装置

Fig.1　9 types of microplastic treatment and infiltration device

1.3　入渗模型

1.3.1　累积入渗模型　通过幂函数或指数函数的形式描述累积入渗量与入渗时间的关系适用于描述土壤水分的累积入渗过程,能够较好地反映入渗过程中的动态变化。累积入渗量计算公式为:

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

式中:I 为累积入渗量(mm);K,α 为模型的拟合参数;t 为入渗时间(min)。

1.3.2 Horton 模型 Horton 模型考虑了入渗初期的高入渗率和随后的衰减过程。适用于描述在蓄水条件下的入渗过程，尤其是在初期入渗速率较高，随后逐渐降低直至稳定的情况。入渗率计算公式为：

$$i=i_f+(i_0-i_f)e^{-\beta t} \tag{2}$$

式中：i 为入渗率（mm/min）；i_f 为稳定入渗率（mm/min）；i_0 为初始入渗率（mm/min）；β 为模型的拟合参数；t 为入渗时间（min）。

1.3.3 Kostiakov 模型 Kostiakov 模型是一个经验模型，它假设入渗率随时间的对数递减，适用于描述入渗初期的快速入渗和随后的缓慢衰减。该模型适用于入渗过程中入渗速率随时间逐渐降低的情况，尤其是在土壤水分入渗初期，当土壤水分含量对入渗率有显著影响时。入渗率（i）计算公式为：

$$i=\alpha t^{-b} \tag{3}$$

式中：α，b 为模型的拟合参数。

1.3.4 Philip 模型 Philip 模型是基于试验数据的经验公式，适用于多种土壤类型和不同的水文条件。入渗率计算公式为：

$$i=b+0.5kt^{-0.5} \tag{4}$$

式中：b，k 为模型的拟合参数。

1.4 模型评价指标

本文使用相对均方根误差（RRMSE）、效率系数（CE）及决定系数（R^2）作为模型的评价指标，若 RRMSE 的值越接近于 0，则模型模拟效果越好，反之，模拟效果越差；CE 值越接近于 1，模型拟合效率越高，反之，模型拟合效率越低。计算公式分别为：

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

$$\mathrm{CE}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{mi}-y_{pi})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_{pi}-\bar{y})^2} \tag{6}$$

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{pi}-y_{mi})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_{pi}-\bar{y})^2} \tag{7}$$

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。

1.5 反演含微塑料土壤的水力参数

Hydrus-1D 数值模型专门用于模拟一维饱和—非饱和多孔介质中的水分、热量和盐分迁移过程，以及植物根系的吸水行为。该模型因其用户友好的操作界面和灵活的边界条件设置，在土壤水文学研究领域被广泛采用[17]。因此本文基于实测的土壤水分入渗数据，利用 Hydrus-1D 软件建立一维非饱和土壤水分运移数值模型，将实测的累积入渗量数据导入，进行土壤水分特征曲线参数反演。在 Hydrus-1D 中根据试验实际情况进行如下设置：①土壤剖面深度为 30 cm；②时间信息，分别设置最大、最小时间步长为 2 和 0.01 min；③初始水力参数，选择碳酸盐岩红土对应的 silt loam 土壤类型，为了提高反演的准确度，根据实测值赋值初始值 θ_r，再进行 5 项水力参数的反演；④选择边界条件，将上边界设置为变水头边界，下边界为自由排水边界，初始条件选择土壤含水量；⑤变水头边界信息，将各时间步长对应的水头都统一设置为各处理的实测定水头值；⑥输入实测累积入渗量，输入入渗时间以及各时刻下对应的实测累积入渗量，并由此确定反演数据类型；⑦土壤剖面的设置，将 30 cm 土柱分为 10 层，每一层对应的初始条件，均为实测的土壤含水量。⑧反演完成，得到反演出来的各项土壤水力参数值、R^2 以及土壤水分特征曲线。

通过对 Hydrus-1D 模型反演的水力参数，分析研究不同微塑料添加后土壤水力参数的变化规律。

1.6 数据处理

试验数据均取两次重复的平均值，采用 Hydrus-1D 模型建立并求解模型以进行参数反演。使用 WPS Office 2019 进行数据处理及绘制装置图，通过 GraphPad Prism 9 进行模型参数拟合及绘制数据曲线图，利用 SPSS 17.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 微塑料种类和大小对对土壤水分入渗过程的影响

由图 2 可知，土壤入渗过程普遍呈现递减趋势。初始阶段入渗速度较快，随后迅速减缓，PP 和 PS 微塑料的初始入渗速率存在显著差异（$p<0.05$）。在稳定入渗阶段，PE 和 PP 微塑料的入渗速率均为 150 μm 组最高，且入渗速率随粒径增大而先增大后减小；而 PS 微塑料则表现为 50 μm 组最高，CK 组次之，150 μm 组和 550 μm 组最低。结果显示，较大粒径的 PS 微塑料显著抑制了土壤水分入渗，而较小粒径的 50 μm PS 微塑料则可能加速了入渗过程。进一步对比不同类型、相同粒径的微塑料处理，在稳定入渗阶段，550 μm 处理下 CK 入渗速率最高；150 μm PE 微塑料的入渗速率超过了 CK，而 PP 和 PS 微塑料的入渗速率低于 CK；50 μm 粒径组则与 150 μm 粒径组相反。表明相同粒径，不同种类的微塑料对土壤水分运移速率的影响也存在显著差异。

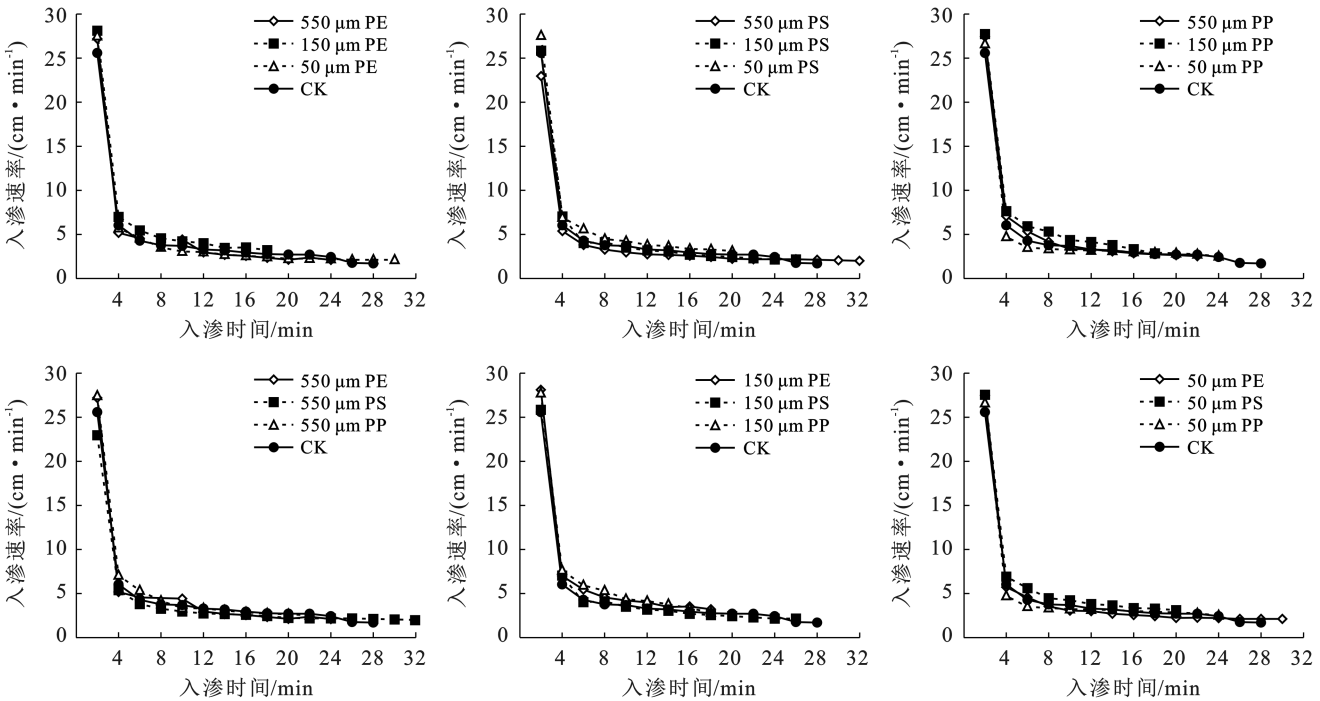

图 2　微塑料种类和粒径对入渗速率随时间变化的影响

Fig.2　Influence of microplastic types and particle sizes on variation of infiltration rate over time

由图 3 可知,在入渗的初期阶段各组累积入渗量增加幅度较大。以湿润峰先到达底部一组为基准,入渗 18 min 时,PE 微塑料累积入渗量表现为随着粒径的增大而先增大后减小,PP 组也表现出了类似趋势,但 PS 组(入渗 20 min 时)则是随着粒径的增大而逐渐减小,50 μm,150 μm, CK,550 μm 的累积入渗量,依次为 132.12,116.93,116.01 和 101.81 mm,说明 PS 微塑料对土壤水分入渗的促进作用随粒径的减小而逐渐减弱。在不同粒径处理下,PP 微塑料在较大粒径(550 μm 和 150 μm)时促进了土壤水分入渗,表现为累积入渗量最高,而 PS 微塑料则对入渗产生了阻碍作用,其累积入渗量最低。表明较大粒径的 PP 微塑料有利于水分入渗,而 PS 微塑料则不利于水分入渗。相反,在较小粒径(50 μm)的处理中,PS 微塑料的累积入渗量超过了 CK,显示出对水分入渗的促进作用,而 PE 和 PP 微塑料的累积入渗量则低于 CK,对水分入渗起到了阻碍作用。说明微塑料粒径和类型对土壤水分入渗能力有不同影响,其中 PP 在大粒径时促进入渗,而 PS 在小粒径时可能有助于水分入渗。

由图 4 可知,在土壤入渗初期湿润锋运移变化速率较大,随着入渗历时的增加逐渐平稳。以入渗完成时间最早的一组为基准,不同粒径的 PP 和 PE 湿润锋运移距离依次为 150 μm,550 μm,50 μm, CK;CK 的湿润锋变化速率最小,是 150 μm 的 0.89 倍。同一时刻下,不同粒径大小的 PS 湿润锋深度差距较 PE, PP 更加明显,湿润锋运移深度随粒径的增大而减小。在入渗 20 min 时 50 μm 组 PS, PE, PP, CK 的运移距离依次为 288.44,242.21,229.97 和 213.55 mm,其中 PS 的运移速率最大是 CK 的 1.35 倍;在较大粒径中,PP, PE 的运移距离均大于 PS,且 PP 与 PE 的湿润锋深度分别是 CK 处理的 1.254 2 和 1.225 6 倍,都起到明显的促进作用,而 CK 和 PS 湿润锋深度比较接近。

2.2　含微塑料的碳酸盐岩红土入渗过程模拟分析

选用累积入渗模型、Horton 模型、Philip 模型和 Kostiakov 模型 4 种土壤入渗经验公式进行拟合,分别探讨其对含微塑料的碳酸盐岩红土入渗的适用性。由表 1 和图 5 可知,4 种模型均有较好的拟合效果,其中 Horton 模型、累积入渗模型、Kostiakov 模型在所有处理下的决定系数 R^2 均大于 0.90,3 者中 Kostiakov 模型 R^2 相对较低。Philip 模型的决定系数 R^2 和 CE 值均处于 0.72～0.85。其中 150 μm 的 PP 微塑料在 Horton 模型、Kostiakov 模型及累积入渗模型下 CE 值相较其他组最大,RRMSE 值相较其他组最小,模型拟合效率高,拟合效果好。基于上述两个评价指标和决定系数 R^2,所有处理综合对比下,Horton 模型和累积入渗模型拟合效果均较好,拟合效率均较高,其余两个模型相对较低,具体为 Kostiakov 模型适用性强于 Philip 模型。

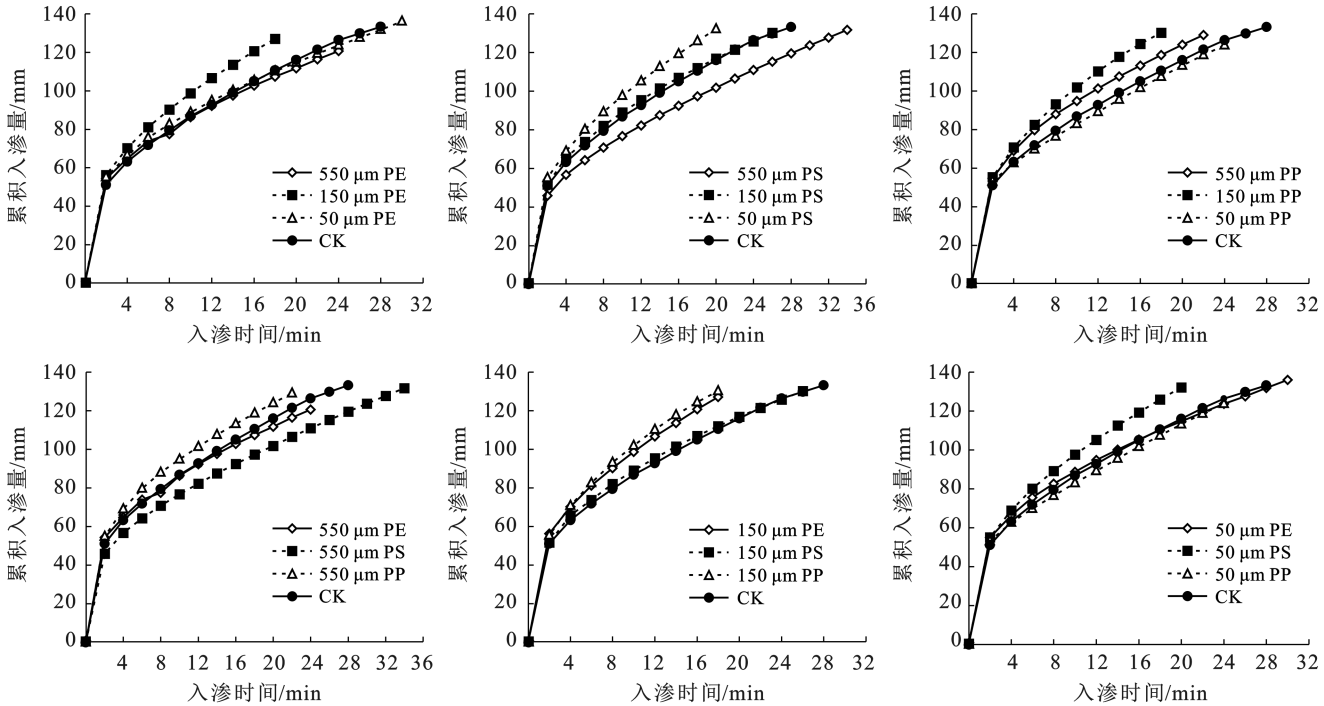

图 3 微塑料种类和粒径对累积入渗量随时间变化的影响

Fig.3 Impact of microplastic types and particle sizes on cumulative infiltration volume over time

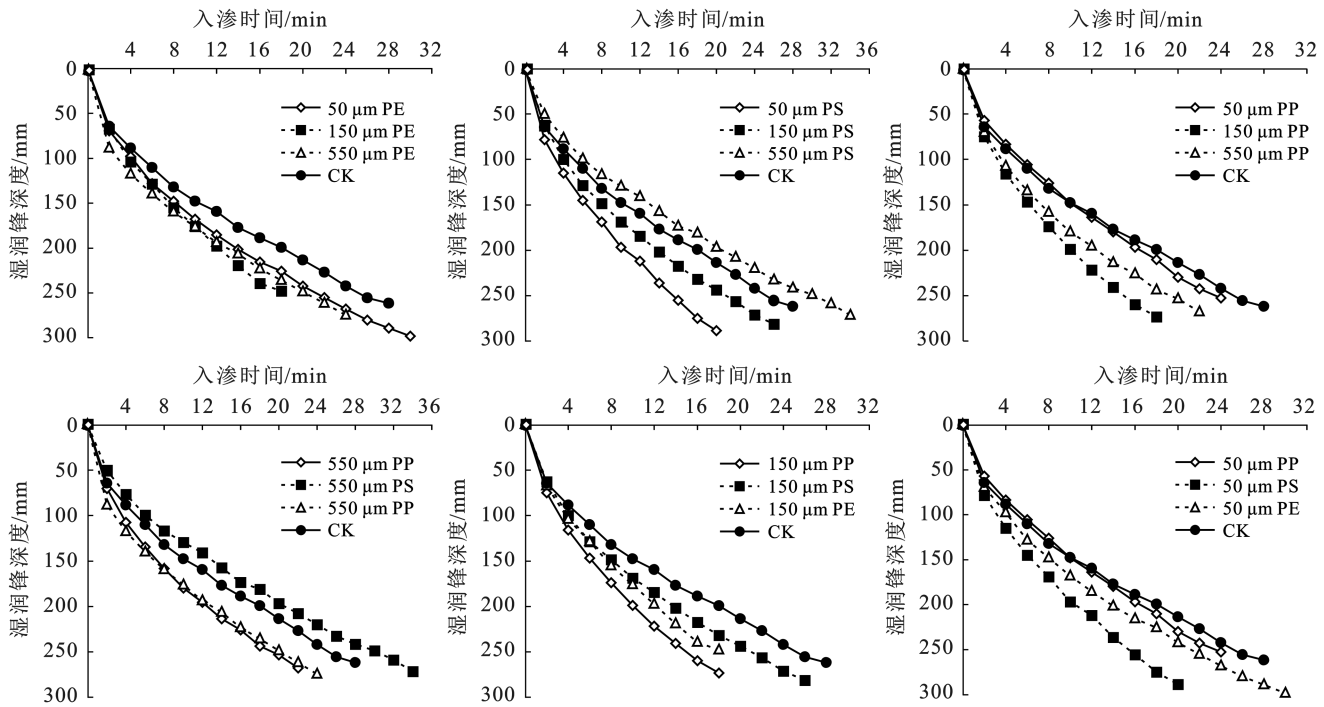

图 4 微塑料种类和粒径对湿润锋随时间变化的影响

Fig.4 Impact of microplastic types and particle sizes on movement of wetting front over time

2.3 反演含微塑料土壤水力参数

由表 2 可知，在不同的微塑料种类和粒径的影响下，Hydrus-1D 反演出的残余含水量(θ_r)、饱和含水量(θ_s)和土壤饱和导水率(K_s)都只存在细微差异。其中 PE 残余含水率(θ_r)和经验参数(n)随粒径的减小而减小，由于残膜量增多，塑料薄膜的不透水性导致吸附在横向铺展残膜上的残余水分难以排出，因此残余含水率随之升高。PS 残余含水率 θ_r 和经验参数 n 则随粒径的减小而增大，PE，PP 微塑料的饱和含水量和饱和导水率都随粒径的减小而先增大后减小，PS 微塑料的 θ_s 则表现为随粒径的减小而先减小后增大，K_s 随粒径的减小而增大。PE，PP 微塑料在

550 μm 时,θ_s 一致,150 μm 时仅相差 0.001 cm^3/cm^3。PE, PP 和 PS 这 3 种微塑料中最大饱和含水量分别是最小之间(0.553,0.554,0.555 cm^3/cm^3)差距非常小,其最大值与最小值仅相差 0.002 cm^3/cm^3,且在 PE, PP 微塑料中均是 150 μm 处理的饱和导水率最大。另外,当粒径相同时,550 μm(0.544 cm^3/cm^3)和 150 μm(0.548 cm^3/cm^3)处理的 θ_s 均值相较 50 μm (0.531 cm^3/cm^3)处理更为接近,分别是 50 μm 的 1.02和 1.03 倍,K_s 同样十分接近,分别为 50 μm 的 1.03,1.05 倍。

表 1　Horton 模型、Philip 模型、Kostiakov 模型、累积入渗模型拟合结果

Table 1　Fitting results of Horton model, Philip model, Kostiakov model and cumulative infiltration models

微塑料种类	粒径/μm	Horton 模型			Philip 模型			Kostiakov 模型			累积入渗模型		
		RRMSE	CE	R^2	RRMSE	CE	R^2	RRMSE	CE	R^2	RRMSE	CE	R^2
PE	550	0.149	0.988	0.988	0.644	0.774	0.782	0.355	0.844	0.949	0.020	0.990	0.990
	150	0.079	0.995	0.995	0.482	0.818	0.818	0.264	0.939	0.954	0.013	0.995	0.993
	50	0.120	0.992	0.993	0.658	0.758	0.772	0.327	0.899	0.957	0.016	0.992	0.993
PS	550	0.104	0.993	0.994	0.650	0.746	0.746	0.378	0.866	0.934	0.022	0.987	0.998
	150	0.107	0.993	0.993	0.563	0.805	0.806	0.283	0.926	0.961	0.024	0.992	0.997
	50	0.103	0.992	0.992	0.504	0.806	0.806	0.289	0.924	0.946	0.017	0.993	0.970
PP	550	0.106	0.993	0.993	0.526	0.813	0.821	0.256	0.940	0.965	0.009	0.997	0.985
	150	0.110	0.990	0.990	0.421	0.848	0.848	0.232	0.952	0.960	0.008	0.999	0.985
	50	0.048	0.999	0.999	0.700	0.717	0.717	0.402	0.852	0.932	0.032	0.982	0.994

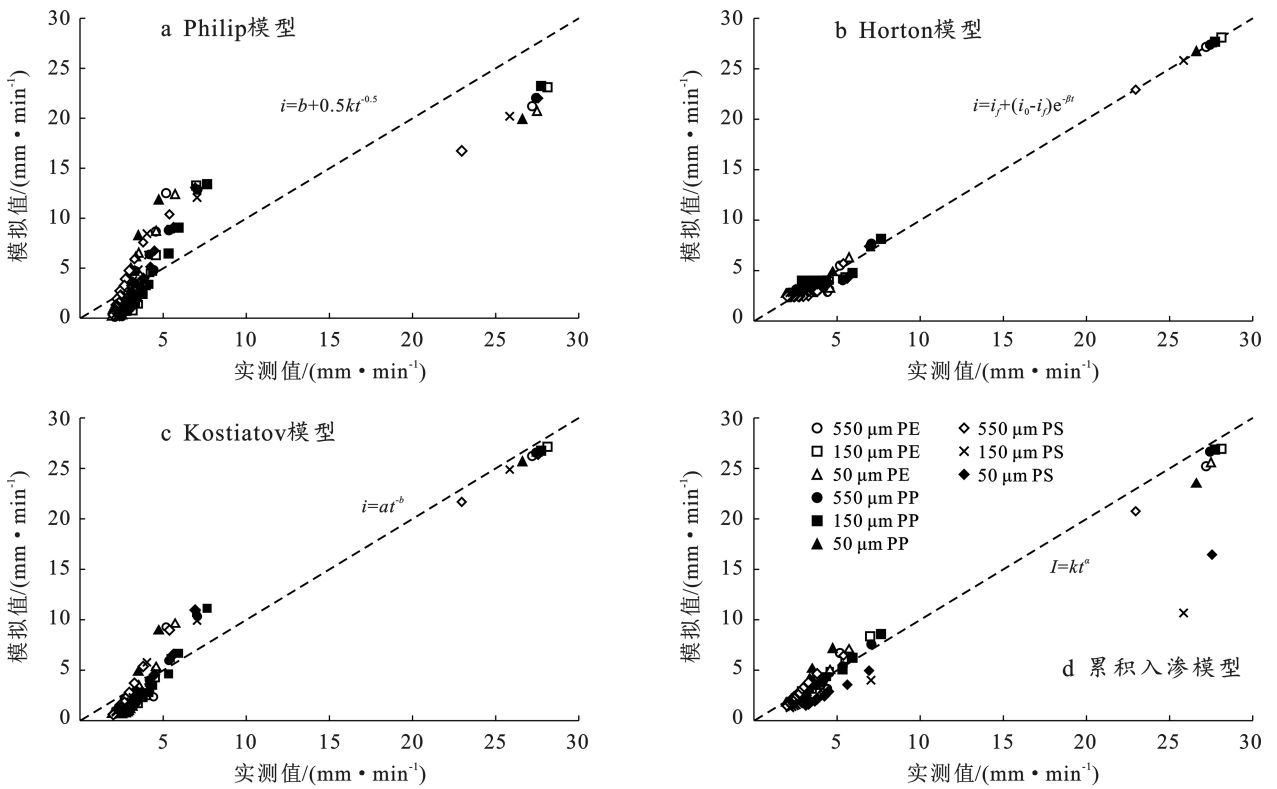

图 5　不同入渗模型的入渗速率模拟值与实测值

Fig.5　Simulated infiltration rates from different infiltration models versus measured values

通过 Hydrus-1D 反演得到的 5 项水力参数,进行正演得出土壤含水率与压力水头的关系(土壤水分特征曲线),由该曲线可以间接反映土壤内部结构的变化。

由图 6 可知,150 μm PS 的曲线位于所有处理的最右端,持水能力最强,而 550 μm 是位于最左端,持水能力最弱,可见 PS 微塑料粒径大小的改变对于土壤持水能力的影响最明显。PS 和 PP 微塑料均随粒径的减小,曲线先右移再左移。而 PE 微塑料随粒径的减小,曲线先左移后右移,持水能力先减弱再增强。

表 2 Hydrus-1D 模型的土壤水力参数

Table 2 Soil hydraulic parameters of Hydrus-1D model

材料	粒径/μm	残余含水量 θ_r/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	饱和含水量 θ_s/($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	拟合参数 α/(cm^{-1})	经验参数 n	土壤饱和导水率 K_s/($cm \cdot min^{-1}$)	决定系数 R^2
PE	550	0.064	0.538	0.038	3.289	0.096	0.998
	150	0.051	0.553	0.038	3.280	0.100	0.996
	50	0.046	0.533	0.038	3.154	0.091	0.997
PP	550	0.046	0.538	0.038	1.960	0.106	0.997
	150	0.045	0.554	0.038	1.360	0.107	0.995
	50	0.066	0.515	0.038	2.831	0.096	0.997
PS	550	0.025	0.555	0.038	2.064	0.095	0.999
	150	0.045	0.536	0.038	2.772	0.097	0.998
	50	0.068	0.545	0.038	3.527	0.100	0.999

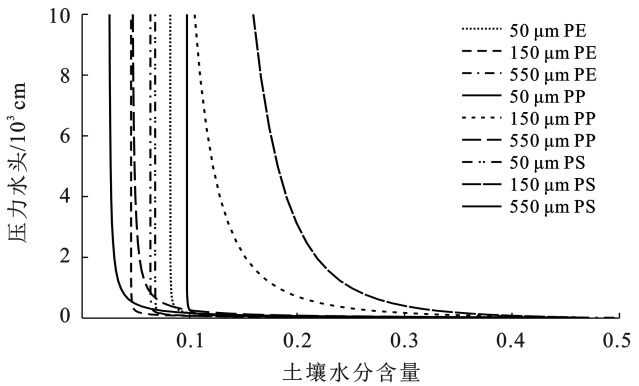

图 6 含微塑料的碳酸盐岩红土土壤水分特征曲线

Fig.6 Soil water characteristic curve of microplastic-contaminated carbonate red soil

3 讨论

3.1 不同种类和粒径的微塑料对碳酸盐岩红土入渗过程的影响及原因

土壤水分入渗是农田水循环的关键环节，其过程深受土壤结构、有机质含量及团聚体分布等土壤性质的影响[8]。碳酸盐岩红土作为西南喀斯特地貌区域典型的土壤类型，在贵州省广泛分布，且土壤孔隙连通性较差，限制了水分和空气的交换效率[18]。此外，微塑料的引入显著影响了土壤的水力特性和团聚体稳定性[19]。微塑料在土壤中的迁移主要得益于土壤的多孔性结构，其迁移行为受到淋溶、浮力、重力及地下径流等多重作用的共同影响，表现为复杂的垂直和水平迁移模式[20]。在入渗初期，由于土壤表面干燥，湿润锋面的水势梯度和非饱和度较大，因此初期土壤入渗速率较快。在入渗过程中，可以将微塑料对土壤水分入渗过程的影响分为阻碍作用和促进作用，当土壤通透性改变时入渗受到影响即发挥阻碍作用，当微塑料本身特性（疏水性、吸附性、表面能等）开始起作用，并充当入渗通道时为促进作用，随着颗粒大小的改变，其作用表达亦会转变[21]。不同粒径大小的累积入渗量差异显著（$p<0.05$），PS 的累积入渗量、湿润锋、入渗速率都表现为随粒径的增大而减小的趋势，其中 550 μm 处理入渗过程均低于 CK 处理，在大颗粒 PS 的影响下土壤入渗性能降低，粒径的增大改变了土壤孔隙分布，微塑料堵塞了土壤水分入渗通道，此时微塑料物理结构性质作用所引起的抑制作用强于促进作用，使得大颗粒 PS 微塑料呈现阻碍作用。同时这也 Dong 等[22]的研究结果一致，由于淋滤作用随微塑料粒径的减小而逐渐减弱，所以随着 PS 微塑料粒径的增大，微塑料在土壤中的运移能力减弱。

聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）作为农用塑料薄膜的常用材料，当它们在土壤中的残留量积累到一定程度后，会破坏土壤结构和质地的均匀性，同时改变土壤孔隙结构。这种变化会进一步影响土壤的水动力学特性，从而导致土壤水分入渗能力显著降低。农用残膜与土壤颗粒之间会形成“孔隙差异界面”，这一界面的存在，使得空气容易在其中聚集，随着残膜量的增加，空气压力也随之增大，这进一步增强了土壤水分的入渗阻力[23]。本试验使用土壤是均质粉砂壤土，其黏粒含量较高，经过 2 mm 的筛分处理后，土壤主要以中小孔隙的形式存在。在添加了 PE 和 PP 微塑料后，当微塑料的粒径为 50 μm 时，由于其粒径过小，尚未对土壤孔隙分布产生显著影响，因此其累积入渗量和入渗速率与对照组相比差异很小，即曲线重合度较高。然而，当微塑料的粒径增大至 150 μm 时，所产生的作用发生了转变。此时，微塑料能够形成水稳性大团聚体和大孔隙[24]，这不仅改变了土壤的结构，还导致了水分的运移速度加快和累积入渗量的增加，这是由于残留农膜增加了土壤孔隙的过水能力，促使含膜土层形成优势流，从而提高了水分迁移速度[25]。进一步地，当微塑料的粒径达到 550 μm 时，大颗粒的

微塑料开始堵塞土壤水分的入渗通道,导致入渗速率降低,累积入渗量减少,这与李玥等[26]研究结果一致。值得注意的是,不同类型的微塑料对土壤水分入渗过程的影响存在差异。这种差异可能源于微塑料的表面能、表面粗糙度等物理特性的不同,这些特性影响了微塑料与土壤颗粒的相互作用以及水分的入渗方式。因此,微塑料的粒径大小和类型是影响土壤水分入渗能力的重要因素,需要在农业生产和环境保护中予以充分考虑。

3.2 不同种类和粒径的微塑料对碳酸盐岩红土土壤水力参数的影响

Hydrus-1D 是可以模拟变饱和多孔介质中一维水分运移过程的一个软件,被广泛应用于土壤的水分和溶质运移等方面的研究,并且已经有大量研究发现,Hydrus-1D 在反演参数研究中方便高效,模拟精度较高[27]。本研究通过 Hydrus-1D 建立一维非饱和土壤水分运移数值模型,结合实测数据反演不同微塑料添加下的碳酸盐岩红土水力参数,其中每种处理反演结果的决定系数 R^2 均在 0.90 以上,表明该模型适用于含微塑料的碳酸盐岩红土水力参数的反演,也为类似情况下的水力参数范围提供一些参考。

土壤水分特征曲线描述了土壤含水率与吸力之间的关系,不仅反映了土壤的持水能力,也能够间接反映出土壤中孔隙的分布,是模拟土壤水分运动的重要参数对土壤水分的有效性、土壤水分运动与溶质运移等研究具有重大意义。饱和导水率与持水能力之间存在一定的关系。土壤的饱和导水率较高,意味着土壤的孔隙结构较大,水分容易渗透和流动,这可能导致土壤的持水能力较低。据巩炜[28]的研究表明,土壤对水分的吸持能力受土壤颗粒粗细程度的影响,土壤颗粒越粗,表面积越大,形成的孔隙就会越大,土壤对水分的吸持能力就会减小,反之土壤对水分的吸持能力就会增大。这也印证了 PE 和 PP 微塑料的水分动态变化,随着粒径从 50 μm 增大到 150 μm,饱和导水率也在增大,持水能力降低,水分更容易流失。再随着粒径增大至 550 μm,此时持水能力开始略微上升,这可能是在粒径增大的同时,由于添加的总质量固定,所以导致添加微塑料颗粒量减小,在粒径和数量的复合影响下,土壤持水能力则表现为小幅的上升,这也与 Wang 等[29]测定均匀混合残留农膜土壤水分特征曲线的研究发现一致,随着土壤中残膜量减少,土壤持水能力呈现上升趋势。

4 结 论

(1) 在所有处理下,土壤水分入渗过程均有不同,PS 微塑料随粒径的减小,累积入渗量越大,入渗速率越大,同时 PS 粒径增大对土壤水分入渗的促进作用减小。PE 和 PP 微塑料累积入渗量、入渗速率随粒径的增大表现为先增大后减小,且 PE 和 PP 微塑料都对土壤水分入渗的促进作用随着粒径的增大表现为先增大后减小。

(2) 根据评价指标及决定系数,Horton 模型和累积入渗模型能更加精确的模拟水分运移过程,其余两个模型则是 Kostiakov 模型适用性优于 Philip 模型。Hydrus-1D 模型作为一个在土壤水分运移方面广泛使用的模型,利用其推求水力参数操作高效便捷,其也在含微塑料的碳酸盐岩红土土壤的水力参数反演中展现了优良精准的结果。

参考文献(References)

[1] Rochman C M, Browne M A, Halpern B S, et al. Classify plastic waste as hazardous [J]. Nature, 2013,494:169-171.

[2] 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.

[3] 肖进男,张珍明,张家春.土壤中微塑料来源、污染现状及生态效应研究进展[J].东北农业大学学报,2022,53(11):86-96.
Xiao Jinnan, Zhang Zhenming, Zhang Jiachun. Research progress on source, pollution status and ecological effects of microplastics in soil [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022,53(11):86-96.

[4] Rillig M C, Lehmann A, de Souza Machado A A, et al. Microplastic effects on plants [J]. New Phytologist, 2019,223(3):1066-1070.

[5] Yu Hong, Fan Ping, Hou Junhua, et al. Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: An investigation at the aggregate-fraction level [J]. Environmental Pollution, 2020,267:115544.

[6] Wang Fayuan, Wang Quanlong, Adams C A, et al. Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,424:127531.

[7] Wan Yong, Wu Chenxi, Xue Qiang, et al. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil [J]. Science of the Total Environment, 2019,654:576-582.

[8] Michaelides K, Lister D, Wainwright J, et al. Vegetation controls on small-scale runoff and erosion dynamics in a degrading dryland environment [J]. Hydrological

Processes, 2009,23(11):1617-1630.

[9] Li Yuanqiao, Zhao Caixia, Yan Changrong, et al. Effects of agricultural plastic film residues on transportation and distribution of water and nitrate in soil [J]. Chemosphere, 2020,242:125131.

[10] 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 Zhichao, Zhang Bowen, Ni Jiaxuan, et al. Effect of microplastics on soil water infiltration and evaporation [J]. Environmental Science, 2022,43(8):4394-4401.

[11] 张博文.微塑料对土壤水分运移的影响及机理探究[D].内蒙古 包头:内蒙古科技大学,2022.
Zhang Bowen. Effects of microplastics on soil moisture transport and mechanism exploration [D]. Baotou, Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022.

[12] 张彦,窦明,邹磊,等.不同微塑料赋存环境对小麦萌发与幼苗生长影响研究[J].中国环境科学,2021,41(8):3867-3877.
Zhang Yan, Dou Ming, Zou Lei, et al. Effects of different microplastics occurrence environment on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. China Environmental Science, 2021, 41(8):3867-3877.

[13] 王志超,李仙岳,史海滨,等.农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J].农业机械学报,2015,46(5):101-106.
Wang Zhichao, Li Xianyue, Shi Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):101-106.

[14] 寇诗棋,关卓,鲁旭阳,等.土壤中微塑料迁移及其对有机污染物的影响研究进展[J].土壤,2024,56(3):457-470.
Kou Shiqi, Guan Zhuo, Lu Xuyang, et al. Migration of microplastics in soil and its effect on organic pollutants: A review [J]. Soils, 2024,56(3):457-470.

[15] 宋佃星,马莉,王全九.宝鸡地区典型农田土壤中微塑料赋存特征及其环境效应研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(2):170-175.
Song Dianxing, Ma Li, Wang Quanjiu. Occurrence characteristics and environmental effects of microplastics in typical farmland soils in Baoji area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(2):170-175.

[16] 林晓华,张宁,王润泽,等.微塑料种类、浓度和粒径对黄土区土壤有效磷含量的影响[J].环境科学学报,2023,43(7):331-338.
Lin Xiaohua, Zhang Ning, Wang Runze, et al. Effects of type, concentration and particle size of microplastics on soil available phosphorus [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(7):331-338.

[17] 王立成,朱珠,孔芊芊,等.基于 HYDRUS-1D 土壤不同掺沙模式下水分入渗与蒸发特征研究[J/OL].中国农业科技导报,1-11[2024-10-09]. https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2023.0496.
Wang Licheng, Zhu Zhu, Kong Qianqian, et al. Characteristics of water infiltration and evaporation under different modes of mixing between soil and sand based on HYDRUS-1D [J/OL]. China Agricultural Science and Technology Herald, 1-11[2024-10-09]. https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2023.0496.

[18] 车陆禄,刘冬冬,杨娅,等.喀斯特森林近地表层覆盖对碳酸盐岩红土蒸发过程的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):153-161.
Che Lulu, Liu Dongdong, Yang Ya, et al. Effect of surface cover on evaporation process of carbonate laterite in karst forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(5):153-161.

[19] 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(10):6044-6052.

[20] Zhao Shuling, Zhang Zhiqin, Chen Li, et al. Review on migration, transformation and ecological impacts of microplastics in soil [J]. Applied Soil Ecology, 2022, 176:104486.

[21] 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 Zihan, Cai Lu, Dong Qinge, 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.

[22] Dong Zhiqiang, Qiu Yuping, Zhang Wen, et al. Size-dependent transport and retention of micron-sized plastic spheres in natural sand saturated with seawater [J]. Water Research, 2018,143:518-526.

[23] 曲晨晓,王炜.土壤剖面中砂质夹层的储水作用及机理研究[J].华中农业大学学报,1997,16(5):349-356.
Qu Chenxiao, Wang Wei. Mechanisms of water reserved by sand interlayer in soil profile [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1997,16(5):349-356.

[24] Liu Zihan, Cai Lu, Dong Qinge, et al. Effects of microplastics on water infiltration in agricultural soil on the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2022,271:107818.

(下转第 263 页)

and spatial evolution characteristics of carbon storage in Hefei ecosystem based on PLUS and InVEST models [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(2):205-215.

[21] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据,2019,4(1):86-92.
Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s) [J]. China Scientific Data, 2019,4(1):86-92.

[22] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021,29(6):1018-1029.

[23] 苗议艺.基于 FLUS 和 InVEST 模型的县域土地利用变化及碳储量优化模拟研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2022.
Miao Yiyi. Optimization and simulation of county land use change and carbon storage based on FLUS and InVEST models [D]. Taian, Shangdong: Shandong Agricultural University, 2022.

[24] 陈光水,杨玉盛,谢锦升,等.中国森林的地下碳分配[J].生态学报,2007,27(12):5148-5157.
Chen Guangshui, Yang Yusheng, Xie Jinsheng, et al. Total belowground carbon allocation in China's forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(12):5148-5157.

[25] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013,89:67-76.

[26] Xiang Shujiang, Wang Ying, Deng Hua, et al. Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China [J]. Ecological Indicators, 2022,142:109205.

[27] Sadat M, Zoghi M, Malekmohammadi B. Spatiotemporal modeling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: Case study in Qaem Shahr County, Iran [J]. Environment, Development and Sustainability, 2020,22(8):8135-8158.

[28] 杨小琬,张丽君,秦耀辰,等.1995 年以来黄河下游碳储量时空变化及驱动因素[J].河南大学学报(自然科学版),2022,52(1):20-33.
Yang Xiaowan, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Temporal and spatial variation and driving factors of carbon storage in the lower Yellow River since 1995 [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2022,52(1):20-33.

[29] Chimdi A, Gurmessa E. Effects of land use on selected soil properties and carbon sequestration in the Gurra watershed: The case of Chalia District, West Shoa Zone, Oromia, Ethiopia [J]. South African Journal of Botany, 2023,156:21-28.

[30] Jiang Weiguo, Deng Yue, Tang Zhenghong, et al. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [J]. Ecological Modelling, 2017,345:30-40.

(上接第 224 页)

[25] Shi Zhongjie, Wang Yanhui, Yu Pengtao, et al. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in Liupan Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(12):6090-6098.

[26] 李玥,王春霞,何新林,等.残膜密度及面积对土壤水分累积入渗量的影响[J].应用生态学报,2022,33(4):894-900.
Li Yue, Wang Chunxia, He Xinlin, et al. Effects of residual film density and area on water accumulation infiltration amount of soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(4):894-900.

[27] 陈雨,陈璇,刘瑞芬.基于 HYDRUS-1D 模型的植物根系对人工基质水分特征曲线参数的影响[J].环境科学学报,2022,42(8):325-336.
Chen Yu, Chen Xuan, Liu Ruifen. Effect of plant roots on water characteristic curve parameters of artificial substrate based on HYDRUS-1D model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(8):325-336.

[28] 巩炜.荒漠—绿洲过渡带斑块状植被区土壤水分入渗特征及其影响因素[D].甘肃 兰州:兰州交通大学,2021.
Gong Wei. Characteristics of soil water infiltration and its influencing factors in patchy vegetation areas in the desert-oasis transition zone [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

[29] Wang Zhichao, Li Xianyue, Shi Haibin, et al. Estimating the water characteristic curve for soil containing residual plastic film based on an improved pore-size distribution [J]. Geoderma, 2020,370:114341.