

聚丙烯酰胺与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性的影响

刘欢平, 郑彩霞, 石琪仙, 袁小虎, 陈茜, 闫敏, 余文俊, 张志亮

(四川农业大学 水利水电学院, 四川 雅安 625014)

摘要: [目的] 探究聚丙烯酰胺(PAM)与腐植酸混施对紫色土水分垂直入渗特性的影响,为川西紫色土区水土保持、土壤改良、水分调节及农业水资源高效利用提供理论参考。[方法] 采用室内土柱模拟试验,设置1个CK(无混掺),3个PAM施量水平(PAM-1:1%,PAM-3:3%,PAM-5:5%)和2个腐植酸施量水平(HA-1:0.1%,HA-5:0.5%)。分析入渗速率、累积入渗量与湿润峰运移距离的变化特征,采用入渗模型对入渗过程进行模拟分析。[结果] 与CK相比,各处理可有效降低水分入渗速率,入渗率随着施用量的增加而逐渐降低;相同累积入渗量下,各处理(H_1P_1 除外)入渗时间均大于CK,其中 H_1P_3 和 H_2P_3 处理分别是CK的14.7和6倍,仅 H_1P_1 处理较CK减少了25%;在220 min内,各处理湿润峰运移距离均低于CK,其中 H_1P_3 处理湿润峰运移距离最低(4.98 cm),较CK显著缩短57.67%;模型适用性表现为:通用经验公式>Kostiakov公式>Horton公式>Philip公式,但通用经验公式的稳渗率(f_s)与实测值存在偏差。[结论] PAM与腐植酸混施可有效降低入渗速率,减少累积入渗量与减缓湿润峰运移距离,其减渗作用随着施用量的增加而越明显;最优处理为 H_1S_3 ,腐植酸0.1 g/g,PAM 5 g/g。综合考虑,Kostiakov公式更适合描述川西紫色土的土壤水分入渗过程。

关键词: 腐植酸; 入渗率; 湿润峰; 入渗模型; 聚丙烯酰胺; 累积入渗量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0121-07

中图分类号: S152.7

文献参数: 刘欢平, 郑彩霞, 石琪仙, 等. 聚丙烯酰胺与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 121-127. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.015; Liu Huanping, Zheng Caixia, Shi Qixian, et al. Effect of mixed application of polyacrylamide and humic acid on water infiltration characteristics of purple soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 121-127.

Effect of Mixed Application of Polyacrylamide and Humic Acid on Water Infiltration Characteristics of Purple Soil

Liu Huanping, Zheng Caixia, Shi Qixian, Yuan Xiaohu, Chen Xi, Yan Min, Yu Wenjun, Zhang Zhiliang
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study was to determine the impact of the combined application of PAM (polyacrylamide) and humic acid on the vertical infiltration characteristics of purple soil in order to provide theoretical references for water and soil conservation, soil improvement, water regulation, and efficient utilization of agricultural water resources in the purple soil region of western Sichuan. [Methods] An indoor soil column simulation experiment was conducted with one check treatment (CK, no mixing), three PAM application levels (PAM-1: 1%, PAM-3: 3%, PAM-5: 5%), and two humic acid application levels (HA-1: 0.1%, HA-5: 0.5%). Infiltration rate, cumulative infiltration volume, and wetting peak transport distance were measured and the variation characteristics were analyzed. The infiltration process was simulated and analyzed using infiltration models. [Results] Compared with CK, the other treatments effectively reduced water infiltration rate, and the infiltration rate gradually decreased with increasing application rate. Under the same cumulative infiltration amount, the infiltration time of each treatment (except H_1P_1) was

收稿日期: 2022-10-18

修回日期: 2022-11-25

资助项目: 四川省重点实验室开放基金“油橄榄水肥一体化提质增效示范研究”(项目编号: SZKF2208)

第一作者: 刘欢平(1997—), 男(苗族), 贵州省锦屏县人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土工程。Email: 2150413526@qq.com。

通讯作者: 郑彩霞(1982—), 女(汉族), 甘肃省武威市人, 硕士, 副教授, 主要从事农业水土工程研究。Email: caixia318@163.com。

greater than that of CK, among which H_1P_3 and H_2P_3 were 14.7 times and six times, respectively, the infiltration time of CK. H_1P_1 had an infiltration time that was 25% less than CK. Within 220 min, the wetting peak transport distances in all treatments were lower than that of CK, with the lowest wetting peak transport distance (4.98 cm) in H_1P_3 , which was significantly shorter (57.67%) than that of CK. Model applicability followed the order of general empirical formula > Kostikov formula > Horton formula > Philip formula. However, the steady permeability rate (f_s) of the general empirical formula deviated from the measured values. [Conclusion] PAM mixed with humic acid can effectively decrease infiltration rate, reduce cumulative infiltration, and slow down the transport distance of the wetting peak. The infiltration reduction effect became more evident with increasing application amount. The optimal treatment was H_1S_3 (humic acid 0.1 g/g and PAM 3 g/g. Compared with other formulas, the Kostikov formula was more suitable for describing the soil water infiltration process in the study area.

Keywords: humic acid; infiltration rate; wetting peak; infiltration model; polyacrylamide; cumulative infiltration amount

紫色土是亚热带地区紫红色砂页岩风化发育形成的一种岩性土,广泛分布于四川盆地,是当地重要的耕地资源^[1]。紫色土发育较浅、耕层浅薄、硝酸盐淋溶强烈、土壤结构差、蓄水性能较差,导致紫色土区土壤肥力偏低、水土流失严重且极易遭受侵蚀,较大程度上制约了农业生产力的提高^[2-4]。因此,紫色土改良与治理的问题亟需解决,提高紫色土蓄水持水与保肥性能,改善水肥流失状况对促进四川盆地旱地农业可持续性发展至关重要。腐植酸(humic acid, HA)是有机肥的主要成分之一,由动植物遗骸在经过土壤微生物的分解、转化以及一些化学作用的一系列过程后,形成并累积的一类棕黑色、高分子芳香羧酸族群有机物质,目前主要应用于土壤肥力调节与土壤重金属污染治理等方面。有研究表明,增施天然煤炭腐植酸对盐碱土具有改良作用,可降低土壤电导率与 pH 值,提高土壤含水率^[5]。施加腐植酸可改善土壤吸附复合特性、加强土壤相关酶活性,增加有机质含量^[6-7]。土壤改良剂是能改善土壤状况的非肥料类物质^[8],种类繁多,已广泛应用于农业土壤酸碱性调节,土壤改良及土壤盐碱化与石漠化治理等领域。聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)是一类水溶性线型高分子聚合物,可溶于水,具有较强的黏聚作用,被认为是最具有潜力的人工合成土壤改良剂^[9]。有研究^[10-11]表明,施用 PAM 可显著增加土壤团聚体数量及稳定性,提高土壤入渗和保水性能,减少地表径流与水土流失。肖海等^[12]指出施加 PAM 可降低三峡库区紫色土坡面片蚀可蚀性,减少产流产沙总量。施加 PAM 型保水剂可提高土壤氮素保持与促进氮素转化效果,增强土壤的硝化作用,提高土壤肥料元素离子的抗淋溶性,从而增强土壤保肥能力,提高土壤肥力。国外学者研究发现,高、低分子量 PAM 溶液可促进砂壤土结构稳定,低分子量 PAM 增强土壤物

理和水力特性的效果更加显著^[13-14];单独施加 PAM 可延迟泥灰土与黄土径流时间,降低径流系数,提高稳渗率^[15]。但是单一施用有机物质或化学改良剂对土壤改良效果不够全面,甚至有可能造成不同程度的负面影响。近年来 PAM 型土壤改良剂和有机物质配施引起广泛学者关注。如保水剂与秸秆混施可有效保持土壤水分,增加水分入渗量^[16];PAM+生物炭对土壤保水、减少径流效果最优,PAM+石灰减少土壤流失效果最明显^[17];PAM+腐植酸对内蒙古干旱区土壤改良效果显著,可影响某些土层持水性能、土壤锥体渗透阻力及土壤团聚体粒径^[18]。前人关于施用 PAM 型土壤改良剂或有机物质对防止水土流失,土壤持水保肥能力,促进作物对养分吸收利用的影响等进行了相关研究,但探究 PAM 与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性内在影响机制的研究报道相对较少。本研究以 PAM 和腐植酸为供试材料,以室内土柱试验为基础,采用 4 种常见的入渗模型对其入渗过程进行模拟,进一步探究 PAM 与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性的影响,以期对川西紫色土区水土保持、土壤改良与水分调节及农业水资源高效利用提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

本试验于 2022 年 1—2 月在四川农业大学第 4 教学试验楼进行。供试土壤于 2021 年 12 月采自四川农业大学老板山(102°59'E,29°58'N,海拔 796 m),土壤类型为紫色土,采取多点混合取样法,取样深度 0—20 cm,土壤自然容重 1.29 g/cm³。将不同深度的土壤自然风干,去除根系树叶、砾石等杂质后混合均匀,碾碎过筛(2 mm)备用。供试土壤全氮含量 1.32 g/kg,初始含水率(质量)3.4%,饱和含水率(质量)40%,pH 值 7.5,有机质含量为 15.15 g/kg;土壤

质地为中壤,砂砾含量 36.34%,黏粒含量 16.91%,粉粒含量 46.75%。聚丙烯酰胺(PAM)产自河南省双惠农业科技发展有限公司,阴离子型,分子量大于 700 万;腐植酸(HA)产自合肥千盛生物科技有限公司,有效成分 $\geq 97\%$,溶于碱、不溶于水和酸;市购。

1.2 试验设计与方法

试验采用完全随机区组设计,PAM 与腐植酸施用量参照前人相关研究设置^[19-20]。PAM 设置 3 个水平:PAM-1(1 g/g 土),PAM-3(3 g/g 土),PAM-5(5 g/g 土),腐植酸(HA)设置 2 个水平:HA-1(0.1 g/g 土),HA-5(0.5 g/g 土),1 个对照组(CK,无混掺),共 7 个处理,每个处理重复 3 次,共 21 次试验;不同处理具体施量详见表 1。

表 1 不同处理具体混掺量

Table 1 Specific mixing amount of different treatments

| 处理 | 腐植酸 | 聚丙烯酰胺 | 腐植酸施用量/ (g·g ⁻¹) | 聚丙烯酰胺施 用量/(g·g ⁻¹) |
|-------------------------------|------|-------|---------------------------------|-----------------------------------|
| H ₁ P ₁ | HA-1 | PAM-1 | 0.1 | 1.0 |
| H ₁ P ₂ | HA-1 | PAM-3 | 0.1 | 3.0 |
| H ₁ P ₃ | HA-1 | PAM-5 | 0.1 | 5.0 |
| H ₂ P ₁ | HA-5 | PAM-1 | 0.5 | 1.0 |
| H ₂ P ₂ | HA-5 | PAM-3 | 0.5 | 3.0 |
| H ₂ P ₃ | HA-5 | PAM-5 | 0.5 | 5.0 |
| CK | | | 0 | 0 |

采用一维定水头垂直积水入渗试验,装置主要由供水系统和有机玻璃土柱试管组成。供水系统由马氏瓶和塑料软管组成;马氏瓶高度 25 cm,内径为 9 cm,壁厚 5 mm,用于供水,水头高度控制为 5 cm;土柱装填高度 25 cm,内径 10 cm,壁厚 5 mm,土柱表面水深保持 2 cm。试验前,土柱试管底部放置一张滤纸,将土样按 1.29 g/cm³ 的自然容重分层装入土柱,每层 5 cm;并使用白凡士林在土柱内壁均匀抹面,夯实边缘土壤,避免引起优势流与产生边缘效应;相邻层间进行刷毛,装填完毕后静置 24 h 然后开始试验;按先密后疏的原则观测马氏瓶与湿润锋运移距离,历时 220 min 后停止供水,结束试验。

1.3 数据处理

采用 Excel 统计与整理数据,SPSS 27.0 进行方差分析(ANOVA)和多重比较(Duncan 法, $p = 0.05$),应用 Origin 9.1 进行绘图与 Horton,Kostiakov,Philip 和通用经验公式^[21-22]对土壤水分入渗速率与入渗时间的关系进行模拟分析。

Kostiakov 公式:

$$f_t = a \cdot t^{(-b)} \quad (1)$$

Philip 公式:

$$f_t = 0.5S \cdot t^{-\frac{1}{2}} + f_s \quad (2)$$

Horton 公式:

$$f_t = f_s + (f_0 - f_s) \cdot e^{(-\beta t)} \quad (3)$$

通用经验公式:

$$f_t = f_s + a \cdot t^{(-b)} \quad (4)$$

式中: f_t 为给定时间内的入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); S 为渗吸率(mm/min); a, b 和 β 为模型参数; f_0, f_s 为初始入渗速率和稳定入渗速率(mm/min); e 是常数。

2 结果与分析

2.1 PAM 与腐植酸混施对土壤入渗速率的影响

入渗速率是表征土壤水分入渗能力的重要特征指标,包括初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率。方差分析可知,PAM 对稳定入渗率影响极显著($p < 0.01$),PAM 与腐植酸交互作用对稳定入渗率影响显著($p < 0.05$)。PAM,腐植酸及其交互作用对初始入渗率和平均入渗率影响不显著($p > 0.05$)。土壤水分入渗速率随着时间的推移总体上呈现出“迅速下降至缓慢下降最后趋于稳定”的变化趋势,即在 65 min 后入渗速率趋于稳定(图 1)。

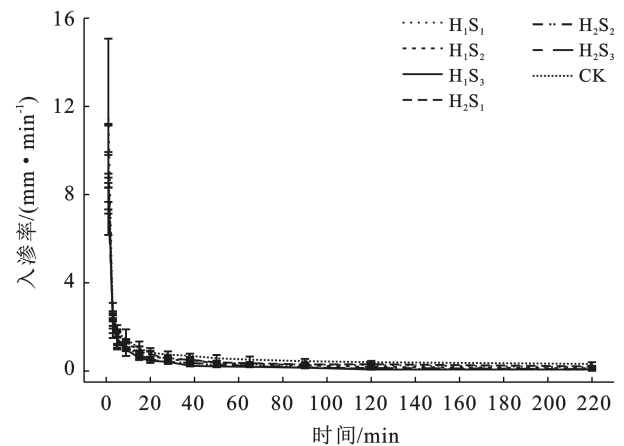


图 1 不同处理对入渗率的影响

Fig.1 Influence of different treatments on infiltration rate

对于初始入渗率,除 H₁P₁ 处理较 CK 提高了 12.57% 外,其他处理均低于 CK;对于平均入渗率,各处理低于 CK,具体表现为:CK(H₁P₁) > H₁P₂ > H₂P₁ > H₂P₂ > H₁P₃ > H₂P₃,其中 H₂P₃ 和 H₁P₃ 处理的平均入渗率较 CK 分别降低了 27.03%, 25.68%;对于稳定入渗率,各处理具体表现为:H₁P₁ > CK(H₁P₂) > H₂P₁ > H₂P₃ > H₁P₃ > H₂P₂,H₁P₁ 处理的稳定入渗率较 CK 显著提高了 71.88%。同一腐植酸施量条件下,初始入渗率、平均入渗率和稳定

入渗率整体随着 PAM 施量的增加而逐渐降低;同一 PAM 施量条件下,初始入渗率、平均入渗率和部分稳定入渗率随着腐植酸施量的增加而逐渐降低,仅在 P_3 条件下稳定入渗速率随着腐植酸施量的增加略微提高了 5.66%。

2.2 PAM 与腐植酸混施对土壤累积入渗量曲线的影响

累积入渗量指的是一定时间段内通过单位土表面积的入渗水分总量,土壤入渗过程未达到稳定之前,通常采用累积入渗量来表征土壤入渗能力^[23-24];达到稳定之后一般可用稳定入渗率来表征土壤的入渗性能^[25-26]。方差分析可知,腐植酸、PAM 与腐植酸交互作用对累积入渗量影响不显著($p > 0.05$),PAM 对累积入渗量影响极显著($p < 0.01$)。入渗前期,各处理的累积入渗量变化差异不明显(图 2);随着时间推移,不同处理的累积入渗量逐渐有明显的变化差异。这可能是因为随着入渗时间的增加,施加的 PAM 和腐植酸与表层土壤发生充分作用,使土壤中分散的大颗粒黏结或者解散成细小颗粒,阻塞土壤孔隙,降低了土壤导水性,从而进一步降低土壤入渗能力^[27]。由图 2 可知,在相同累积入渗量条件下(稳渗前),不同处理入渗时间的变化特征不同,具体表现为: $H_1S_1 > CK > H_1S_2 > H_2S_2 > H_2S_1 > H_2S_3 > H_1S_3$,其中 H_1S_3 , H_2S_3 处理分别是 CK 入渗时间的 14.7 倍、6 倍, H_1S_1 处理较 CK 入渗时间减少了 25%。

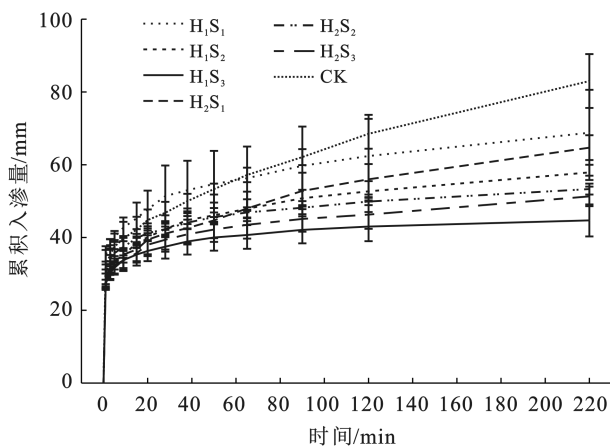


图 2 不同处理对累积入渗量的影响

Fig.2 Influence of different treatments on cumulative infiltration

2.3 PAM 与腐植酸混施对湿润锋运移距离的影响

湿润锋是指土壤被入渗水分湿润的最前端与干土区形成的交界面^[28],能表征水分在土壤基质吸力和重力作用下的运动特征^[29],其运移距离是不同因素对土壤水分入渗影响最直观的体现。方差分析可知,腐植酸、PAM 与腐植酸交互作用对湿润峰运移

距离影响不显著($p > 0.05$),PAM 对湿润峰运移距离影响极显著($p < 0.01$)。入渗 10 min 内各处理湿润锋运移距离曲线高度重合,随着入渗时间的推移,各处理土壤湿润峰运移距离逐渐增加,65 min 后趋于稳定(图 3)。65 min 时,各处理的湿润峰运移距离随着 PAM 或腐植酸施量的增加而逐渐缩短,具体表现为 $CK > H_1P_1 > H_1P_2 > H_2P_1 > H_2P_2 > H_2P_3 > H_1P_3$,与 CK 相比各处理依次减少了 16.96%, 18.26%, 20.36%, 32.69%, 34.68%, 40.98%。在 220 min 内,各处理湿润峰运移距离均低于 CK,其中 H_1S_3 处理湿润峰运移距离最低(4.98 cm),较 CK 缩短了 57.67%。

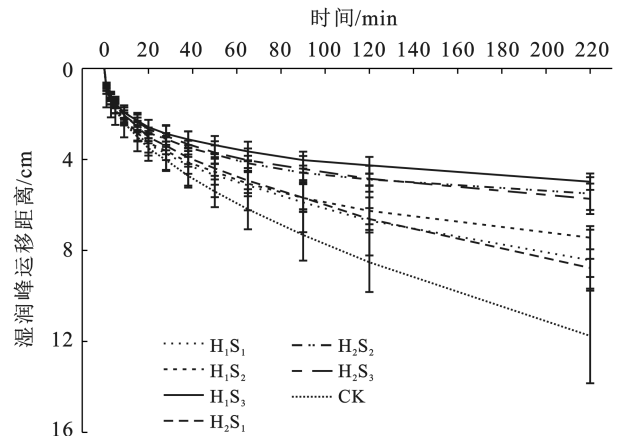


图 3 不同处理对湿润锋运移距离的影响

Fig.3 Influence of different treatments on migration distance of wetting peak

2.4 土壤入渗模型分析

国内外关于模拟土壤入渗过程的模型众多,根据其是否具有物理意义主要划分成两类:①物理模型。包括 Horton, Philip 公式;②经验公式。包括 Kostikov 公式、通用经验公式。其中,决定系数 R^2 的取值范围为 0~1, R^2 越接近于 1 表明模型变量对土壤入渗速率的解释能力越强^[29]。选择以上 4 种入渗模型对本研究土壤入渗过程进行模拟,其拟合结果如表 2—4 所示。

表 2 不同处理对入渗率的显著性检验结果

Table 2 Significance test results of different treatments on infiltration rate

| 因素 | 初始入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) | 稳定入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) | 平均入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) |
|-----------|---|---|---|
| 腐植酸 | 2.092 ^{ns} | 0.029 ^{ns} | 1.983 ^{ns} |
| 聚丙烯酰胺 | 1.380 ^{ns} | 18.117 ^{**} | 3.172 ^{ns} |
| 腐植酸×聚丙烯酰胺 | 0.324 ^{ns} | 3.870 [*] | 0.388 ^{ns} |

注: * 表示差异性显著($p < 0.05$); ** 表示差异性极显著($p < 0.01$); ns 表示差异性不显著($p > 0.05$)。下同。

表 3 不同处理对累积入渗量的显著性检验结果

Table 3 Significance test results of different treatments on cumulative infiltration

| 因素 | 累积入渗量/mm |
|-----------|----------------------|
| 腐植酸 | 0.326 ^{ns} |
| 聚丙烯酰胺 | 14.922 ^{**} |
| 腐植酸×聚丙烯酰胺 | 2.895 ^{ns} |

表 4 不同处理对累积入渗量的显著性检验结果

Table 4 Significance test results of different treatments on migration distance of wetting peak

| 因素 | 湿润峰运移距离/mm |
|-----------|----------------------|
| 腐植酸 | 0.326 ^{ns} |
| 聚丙烯酰胺 | 14.922 ^{**} |
| 腐植酸×聚丙烯酰胺 | 2.895 ^{ns} |

Kostiakov 公式中,参数 a 为经验入渗系数,近似等于前 3 min 的入渗速率,且 a 值的大小与初始入渗速率成正比关系。本研究中模拟值与实测值的变化趋势大致相同,即拟合结果较好。 b 值为经验入渗指数,可以反映土壤入渗能力的衰减速度, b 值在 H_1P_1 处理最大,CK 最小;决定系数 R^2 范围 0.977~0.995,拟合效果较好,表明 Kostiakov 公式适用于分析本研究的土壤入渗过程。Philip 公式中,决定系数 R^2 范围 0.830~0.913,表明该公式对入渗速率与时间的变化关系拟合程度较好;土壤渗吸率 S 指土壤依靠毛管力吸收或释放液体的能力,即 S 值越大代表土壤入渗能力越强^[30]。本研究中各处理的 S 值分别为 17.344, 21.776, 18.470, 16.412, 16.395, 16.785 和 14.603,这与实际土壤水分入渗能力不一致,且 Philip

公式拟合的稳定入渗率 f_s 除 H_2P_2 处理(f_s 为 1.137 mm/min)外其他为 -1.524~-0.890 mm/min,与实际不符,表明 Philip 公式不适用于本文试验条件下土壤入渗过程的模拟。

Horton 公式中,决定系数 R^2 范围 0.978~0.989,表明该公式对实测数据的拟合程度较好; f_0 表示初始入渗速率,反映的情况与实测值存在一定的偏差;稳定入渗速率 f_s 具体表现为:CK> H_2P_1 > H_1P_1 > H_1P_2 > H_2P_2 > H_2P_3 > H_1P_3 ,与实测值的大小顺序基本一致;参数 β 是经验常数,决定着土壤水分入渗过程中达到稳定入渗速率的快慢,且 β 值越大表示达到稳定入渗速率的时间就越短;由拟合结果可知,不同处理达到稳渗状态的先后顺序为: H_1P_1 > H_2P_1 > H_1P_2 > H_1P_3 >CK> H_2P_2 > H_2P_3 ,与实测结果有所不同;表明 Horton 公式相较于 Kostiakov 公式而言对本研究土壤入渗过程模拟的适用性较低。通用经验公式中,决定系数 R^2 范围 0.992~0.997,表明该公式对实测数据的拟合程度较好;由拟合结果可知,稳定入渗率 f_s 表现为:CK> H_1P_1 > H_2P_1 > H_1P_2 > H_2P_2 > H_2P_3 > H_1P_3 ,与实测值存在一定偏差,表明通用经验公式适用于分析本研究的土壤入渗过程。

综上所述,通过对各模型的确定系数及参数指标所反映的结果进行分析,模型适用性具体表现为:通用经验公式 > Kostiakov 公式 > Horton 公式 > Philip 公式;其中, Kostiakov 公式的参数反映出的结果与实测值的偏差较小,该公式中拟合参数指标随着 PAM 和腐植酸施量的增加呈现下降趋势,故 Kostiakov 公式更适用于分析与描述本研究中土壤入渗速率随时间变化的过程。

表 5 不同处理 4 种土壤入渗模型拟合结果

Table 5 Fitting results of four soil infiltration models under different treatments

| 处理 | Kostiakov 公式 | | | Philip 公式 | | | Horton 公式 | | | | 通用经验公式 | | | |
|----------|--------------|-------|-------|-----------|--------|-------|-----------|--------|---------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | a | b | R^2 | S | f_s | R^2 | f_s | f_0 | β | R^2 | a | b | f_s | R^2 |
| H_1P_1 | 11.699 | 1.287 | 0.984 | 21.776 | -1.524 | 0.830 | 0.570 | 28.673 | 0.979 | 0.989 | 11.338 | 1.576 | 0.438 | 0.995 |
| H_1P_2 | 9.642 | 1.081 | 0.984 | 18.470 | -1.195 | 0.874 | 0.548 | 20.085 | 0.754 | 0.981 | 9.374 | 1.298 | 0.359 | 0.994 |
| H_1P_3 | 8.408 | 1.104 | 0.995 | 16.412 | -1.165 | 0.889 | 0.357 | 16.196 | 0.674 | 0.984 | 8.278 | 1.208 | 0.166 | 0.997 |
| H_2P_1 | 8.645 | 1.044 | 0.977 | 16.395 | -0.978 | 0.868 | 0.580 | 18.621 | 0.790 | 0.978 | 8.344 | 1.332 | 0.417 | 0.992 |
| H_2P_2 | 8.557 | 1.043 | 0.994 | 16.785 | 1.137 | 0.900 | 0.408 | 15.916 | 0.640 | 0.983 | 8.414 | 1.151 | 0.189 | 0.997 |
| H_2P_3 | 7.399 | 0.969 | 0.993 | 14.603 | -0.926 | 0.913 | 0.406 | 13.160 | 0.596 | 0.981 | 7.265 | 1.079 | 0.183 | 0.997 |
| CK | 9.041 | 0.907 | 0.980 | 17.344 | -0.890 | 0.896 | 0.715 | 17.065 | 0.657 | 0.982 | 8.706 | 1.170 | 0.494 | 0.997 |

3 讨论

腐植酸是聚电解质大分子化合物,络合反应过程中高价阳离子与含氧官能团配位形成具有疏水性的聚集体络合物,其通过减少土壤团聚体水解来促进团

聚体的稳定性^[31],从而有效改善土壤结构,提高土壤持水性能。聚丙烯酰胺(PAM)为线性水溶性高分子聚合物,主链上含有大量的酰胺基,遇水溶解可形成链状结构,能够粘结、吸附与包裹大量松散的土壤颗粒并形成结皮,从而有效减少土壤颗粒水分蒸发,提

高土壤颗粒持水性能^[32-34]。目前有关 PAM 对土壤入渗过程影响的研究结论出现两极分化,一方面学者认为施加 PAM 可提高土壤水分入渗速率、增加累积入渗量及湿润锋运移距离,从而提高土壤入渗性能;另一方面学者认为单施 PAM 或者 PAM 与其他物质混施均会抑制水分入渗,最终降低土壤入渗性能^[35-37]。有研究^[27,38-39]指出,施用 PAM 能提高或降低土壤水分入渗性能主要取决于 PAM 的种类、分子量大小、使用剂量、土壤质地与类型、土壤水分含量及施用方法等。于健等^[11]研究发现,喷洒 PAM 乳胶(2 g/m²)和 PAM 溶液(2 500 g/m³)的土壤稳定入渗率较 CK 平均可提高约 1.5 倍,施用干粉 PAM(2 g/m²)的土壤稳定入渗率较 CK 平均可提高约 1.0 倍。本研究发现,PAM 和腐植酸混合施用表现出明显的减渗作用。可能是因为本研究 PAM 的施用方式(与腐植酸混施)、施用量(1.0%~5.0%)与其不同所导致的。本研究发现,入渗前期各处理对累积入渗量、湿润峰的影响不明显,达到稳渗后,较 CK 总体上减少了累积入渗量、减缓了湿润峰运移距离,从而降低入渗性能。这一结论与砂壤土^[40-41]和盐渍化土^[42]模拟试验结果一致。有研究^[43]结果表明,在滨海盐碱土中施加腐植酸可减缓湿润峰运移距离并减少累积入渗量,本研究结果与该结论一致,说明腐植酸施加于滨海盐碱土与紫色土中所发挥的作用大致相同。孙燕等^[44]研究发现,在新疆中度盐碱土中施用腐植酸可降低水分入渗速率,增加累积入渗量。本研究中施加腐植酸较 CK 均减少了累积入渗量,且随着腐植酸施入量的增加,累积入渗量减少的量加大。可能是因为腐植酸种类、土壤类型(中度盐碱土)及施用量(0,1,2,4,8 g/kg)均不同所导致的。

国内外学者在土壤水分入渗的研究过程中建立了诸多模型,用来模拟分析土壤水分入渗过程随入渗时间的变化特征,但是不同的入渗模型都具有其适用性^[45]。本研究中 4 种入渗模型的适用性具体表现为:通用经验公式 > Kostiakov 公式 > Horton 公式 > Philip 公式,虽然通用经验公式的决定系数 R^2 略高于 Kostiakov 公式,但是通用经验公式的稳定入渗率 Image 与实测值存在偏差,而 Kostiakov 公式中的各项参数拟合值均与实测值基本一致,综合考虑之下认为 Kostiakov 公式更适用于模拟分析本研究条件下的水分入渗过程。

本研究基于室内垂直土柱模拟试验初步探究 PAM 与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性的影响,未考虑气象、降雨、作物以及土壤空间结构变异等因素,有待在降雨或灌溉条件下进一步探究不同分子

量、施用量和粒径的 PAM 与腐植酸长期混施对紫色土水分运移特性的影响,阐明二者配施应用对农田土壤水分循环及农田微环境的影响机制。

4 结论

(1) PAM 与腐植酸混施可有效降低入渗速率,减少累积入渗量与减缓湿润峰运移距离,降低紫色土的入渗能力,随着施用量的增加其减渗作用越明显。本试验条件下综合入渗率、累积入渗量与减渗效果考虑,最优处理为 H₁S₃(腐植酸 0.1 g/g, PAM 5 g/g),减渗效果最佳。

(2) 从模型的决定系数、参数指标等综合考虑, Kostiakov 公式更适用于描述本研究中土壤入渗速率随时间变化的过程,且该公式的拟合参数指标随着 PAM 和腐植酸施量的增加呈现下降趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 蒋美佳,刘晓林,冯钰梅,等.有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):99-104.
- [2] 余子洁,郭大陆,李致同,等.不同季节冬水田紫色土细菌群落的垂直分布规律[J].微生物学通报,2022,49(11):4699-4712.
- [3] 柴冠群,赵亚南,黄兴成,等.不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J].水土保持学报,2017,31(1):296-302.
- [4] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.
- [5] 顾鑫,任翠梅,杨丽,等.天然煤炭腐植酸对盐碱土改良效果的研究[J].灌溉排水学报,2017,36(9):57-61.
- [6] Xue Shuwen, Xiao Yawen, Wang Guoqiang, et al. Adsorption of heavy metals in water by modifying Fe₃O₄ nanoparticles with oxidized humic acid [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering aspects, 2021,616(5):333-342.
- [7] Krystyna C, Solek P K, Filipek M B, et al. Comparative effects of lignite-derived humic acids and FYM on soil properties and vegetable yield [J]. Geoderma, 2017,303(1):85-92.
- [8] 冀拯宇,周吉祥,张贺,等.不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(8):1759-1767.
- [9] 邱德勋,尹殿胜,穆兴民,等.聚丙烯酰胺施用量、初始含水率和容重对土壤水分入渗特性的影响[J].土壤通报,2022,53(2):333-340.
- [10] 曹丽花,赵世伟,梁向锋,等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J].农业工程学报,2008,5(1):45-49.
- [11] 于健,雷廷武, Isaac Shainberg,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.
- [12] 肖海,向瑞,刘畅,等.聚丙烯酰胺(PAM)对三峡库区紫色土坡面片蚀的影响[J].水土保持学报,2022,36(5):32-37.
- [13] 马征,姚海燕,张柏松,等.保水剂对粘质潮土团聚体分布、稳定性及玉米养分积累的影响[J].水土保持学报,2017,31(2):221-226.
- [14] Ammar A A, Hamdan E H, Gharaibeh M A, et al. Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer [J]. Soil and Tillage Research, 2021,206(2):821-831.
- [15] Seyed H S, Hazbavi Z, Kiani H M, et al. The hydrologic behavior of loess and marl soils in response to biochar and polyacrylamide mulching under laboratorial rainfall simulation conditions [J]. Journal of Hydrology, 2021,592(1):620-634.
- [16] 冯瑞云,王慧杰,郭峰,等.秸秆型土壤改良剂对土壤结构和水分特征的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(9):44-48.
- [17] B Kebede, Tsunekawa A, Haregeweyn N, et al. Effect of polyacrylamide integrated with other soil amendments on runoff and soil loss: case study from north-west Ethiopia [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022,10(3):487-496.
- [18] Xu Shengtao, Zhang Lei, McLaughlin N B, et al. Effect of synthetic and natural water absorbing soil amendment soil physical properties under potato production in a semiarid region [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 148(5):31-39.
- [19] 何靖,罗林涛.腐植酸对水分入渗的影响试验研究[J].节水灌溉,2020(10):47-50.
- [20] 孙波,吕春娟.聚丙烯酰胺在土壤改良中的应用[J].水土保持应用技术,2020(6):23-26.
- [21] Fariba B, Zolfaghari A A, Yazdani M R, et al. Spatial analysis of infiltration in agricultural lands in arid areas of Iran [J]. Catena(Giessen), 2018,170(11):25-35.
- [22] 刘春成,李毅,任鑫,等.4种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J].农业工程学报,2011,27(5):62-67.
- [23] 赵云鹏,白一茹,王幼奇,等.城市绿地覆盖砂石后土壤水分入渗过程及模型分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(7):66-72.
- [24] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等.生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J].农业工程学报,2015, 31(16):128-134.
- [25] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.
- [26] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J].农业机械学报,2019,50(9):290-299.
- [27] 王春霞,王全九,吕廷波,等.添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(1):31-35.
- [28] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等.羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117-123.
- [29] 詹舒婷,宋明丹,李正鹏,等.不同秸秆生物炭对土壤水分入渗和蒸发的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):294-300.
- [30] 张培培,赵允格,王媛,等.黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J].应用生态学报,2014,25(3):657-663.
- [31] Tian Xiaoming, Fan Hua, Wang Jiqing, et al. Effect of polymer materials on soil structure and organic carbon under drip irrigation [J]. Geoderma, 2019,340(4):94-103.
- [32] 白岗栓,罗东,苗庆丰,等. PAM喷施量与施用方式对风沙土风蚀的影响[J].农业工程学报,2020,36(10):90-98.
- [33] 韩冬,魏占民,于健,等.基于不同湿润速度下 PAM 水解过程对砂壤土入渗的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(6):1174-1180.
- [34] 于海龙,于健,李平,等. PAM 与不同土壤调理剂混合施用对降雨入渗和土壤侵蚀的影响[J].水土保持通报,2012,32(5):152-155.
- [35] 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.
- [36] 郭韦.保水剂对土壤水分入渗特性影响的研究[D].河北邯郸:河北工程大学,2011.
- [37] 刘东,任树梅,杨培岭.聚丙烯酰胺(PAM)对土壤水分蓄渗能力的影响[J].灌溉排水学报,2006(4):56-58,63.
- [38] Yu Jian, Lei Tao, Shainberg I. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(2):630-636.
- [39] Lentz R D. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide and surfactants: Applications for irrigated agriculture [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,58(5):290-300.
- [40] 白文波,宋吉青,李茂松,等.保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):18-23.
- [41] 张振华,谢恒星,刘继龙,等. PAM 对一维垂直入渗特征量影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2006(3):75-77.
- [42] 张健,魏占民,韩冬,等.聚丙烯酰胺对盐渍化土壤水分垂直入渗特性的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):256-261.
- [43] 李晓菊,单鱼洋,王全九,等.腐殖酸对滨海盐碱土水盐运移特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):288-293.
- [44] 孙燕,王建,王全九,等.生化黄腐酸对盐碱土水盐运移特征的影响[J].农业机械学报,2022,53(1):302-310.
- [45] 姚宝林,李光永,李发永.南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J].中国农业科学,2014,47(22):4453-4462.