

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.013.

刘旭, 白一茹, 马娴. PAM对银川城市绿地土壤水分运动及水力参数的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 217-224.

LIU Xu, BAI Yiru, MA Xian. Effects of PAM on Soil Water Movement and Hydraulic Parameters of Urban Green Spaces in Yinchuan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 217-224.

PAM对银川城市绿地土壤水分运动及水力参数的影响

刘旭^{1,2}, 白一茹¹, 马娴^{1,2}

(1.宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021;

2.宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘要: [目的]探究不同PAM施加比例下城市绿地土壤水分运动及水力参数的变化,为城市绿地建设和合理利用水资源提供理论参考。[方法]以银川城市绿地土壤为研究对象,采用垂直一维土柱试验,选取5种聚丙烯酰胺(PAM)施加比例(质量比)0%(CK), 0.02%(T₁), 0.04%(T₂), 0.06%(T₃), 0.08%(T₄), 0.1%(T₅),研究湿润锋进程、累积入渗量和入渗速率等入渗特征参数,比较Philip模型、Horton模型、Kostiakov模型及通用经验模型在本研究中的适用性,分析PAM施加比例对土壤水力参数的影响。[结果]入渗历时300 min时,T₁, T₂, T₃, T₄和T₅较CK相比,湿润锋进程分别减少了5.2%, 12.0%, 13.2%, 15.4%和24.2%,累积入渗量分别减少5.9%, 12.8%, 14.7%, 21.4%和31.5%。T₁, T₂, T₃, T₄和T₅稳定入渗速率较CK分别减小10.1%, 22.4%, 23.3%, 29.2%和41.6%;4种入渗模型中Horton模型最适合描述研究区不同PAM施加比例下的城市绿地土壤水分入渗过程($R^2 > 0.886$)。滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 、形状系数 n 随PAM施加比例增大而增大,进气吸力倒数 α 、饱和导水率 K_s 随PAM施加比例增大而减小。[结论]研究表明PAM可以有效改善银川城市绿地土壤水分快速渗漏、持水性能差的状况,提高土壤保水能力。

关键词: 城市绿地土壤; PAM; 水分运动; 水力参数

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0217-08

Effects of PAM on Soil Water Movement and Hydraulic Parameters of Urban Green Spaces in Yinchuan

LIU Xu^{1,2}, BAI Yiru¹, MA Xian^{1,2}

(1.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Breeding Base for State Key Lab. of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] This study explored soil water movement and hydraulic parameters of urban green space with different PAM application ratios to provide theoretical reference for building urban green space and utilizing water resources. [Methods] The soil of urban green space in Yinchuan was taken as the research sample. The vertical one-dimensional soil column test was adopted, 5 PAM addition rates of 0% (CK), 0.02% (T₁), 0.04% (T₂), 0.06% (T₃), 0.08% (T₄), 0.1% (T₅) were added to urban green space soil of Yinchuan. The process of wetting front, cumulative infiltration amount, and infiltration rate were studied. The applicability of the Philip model, Horton model, Kostiakov model and general empirical formula in the soil moisture infiltration process of Yinchuan urban green space containing PAM was compared. The effect of PAM application on soil hydraulic parameters was analyzed. [Results] Compared with CK, the wet front processes of T₁, T₂, T₃, T₄, and T₅ treatments decreased by 5.2%, 12.0%, 13.2%, 15.4% and 24.2%, respectively, and the cumulative infiltration amount reduced by 5.9%, 12.8%, 14.7%, 21.4% and 31.5%,

收稿日期: 2022-04-19

修回日期: 2022-04-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41761049, 41867003); 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03049); 国家重点研发计划项目(2018YFC1802906)

第一作者: 刘旭(1995—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀防治研究。E-mail: liuxu0506@163.com

通信作者: 白一茹(1984—), 女, 陕西渭南人, 副教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治、土壤物理性质研究。E-mail: yr0823@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

respectively, when the infiltration lasted 300 minutes. Compared with CK, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , and T_5 reduced the stable infiltration rate by 10.1%, 22.4%, 23.3%, 29.2% and 41.6%, respectively. The comprehensive comparison results indicated that the simulated accuracies of the four infiltration models decreased in the order: Horton > Kostiakov > Philip > General Empirical Model. The retained water content θ_r , saturated water content θ_s and shape coefficient n increased with the increase of PAM application rate, while the reciprocal α of intake suction and saturated hydraulic conductivity K_s decreased with the increase of PAM application rate. [Conclusion] The addition of PAM can effectively remedy the phenomenon of deep soil leakage and poor water retention in Yinchuan urban green land.

Keywords: urban green space soil; PAM; water movement; hydraulic parameters

城市绿地是城市景观和生态系统的重要组成部分,具有调节地表径流、缓解城市热岛效应、增加碳汇等功能^[1-2],而土壤水分入渗特征及水力参数影响城市绿地发挥各项功能。银川市地处干旱半干旱区,降水少,蒸发大,人均水资源量不足 200 m³^[3],水资源相对缺乏,2021 年银川市建成区绿地率达 40.84%,但银川绿地土壤属砂质壤土,水分渗漏快,保水能力差^[4],仅 2020 年绿化用水 1.83 × 10⁶ m³,绿化养护资金达 3.07 亿元,城市绿地灌溉用水量大、养护投入大,因此改善城市绿地土壤入渗状况,增强土壤持水性能,减少灌溉用水,对提高区域生态承载力和发展潜力,促进黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

施加改良剂是改良土壤入渗性能的常用方法之一,目前常用改良剂包括生物炭^[5],腐殖酸^[6],脱硫石膏^[7],羧甲基纤维素钠(CMC)^[8]和聚丙烯酰胺(Polyacrylamide, PAM)等^[9]。其中 PAM 是一种水溶性线性高分子聚合物,具有无毒无害、易溶于水、粘聚性强和性价比高等特点^[10],已被众多学者应用于改善土壤结构和保水性能。如曹丽花等^[11]研究发现 PAM 可促进水稳性团聚体的形成,改善土壤结构。哈丽代姆·居麦等^[12]研究发现施加 PAM 降低了土壤水分入渗能力。王春霞等^[13]通过研究发现 PAM 可降低砂粉土水分入渗速率,提高蓄水保墒能力。王全九等^[14]研究发现 PAM 能增强土壤保水性能,提高土壤持水能力。上述研究表明 PAM 能改善土壤团聚结构、降低土壤水分入渗能力,增强土壤保水性能。同时一部分学者已经开始将 PAM 应用于城市绿地土壤改良,如王晨光等^[15]研究发现施加 PAM 可降低城市绿地换填介质的容重,增加其饱和含水率。郝珊等^[16]和马笑等^[17]研究结果表明 PAM 施加不仅可以增加绿地土壤饱和含水量,还对绿地土壤污染物具有良好的吸附效果。从上述研究可知,现阶段 PAM 对城市绿地土壤的改良研究主要集中于土壤基本物理性质如容重、饱和含水率,及其对污染物的吸附等方面,对土壤水分运动及水力参数的影响研究较少,限制了 PAM

在城市绿地土壤改良中的进一步应用。

本研究以银川城市绿地土壤为研究对象,选取 5 种 PAM 施加比例,通过室内垂直一维土柱入渗试验,分析不同 PAM 施加比例下土壤水分入渗特征的变化,并评价 4 种入渗模型对施加 PAM 城市绿地土壤水分入渗过程的适用性,同时利用累积入渗量实测数据和 Hydrus-1D 软件反演水力参数,分析 PAM 施加比例对土壤水力参数的影响,以期为我国干旱半干旱地区城市绿地和银川国家生态园林城市建设提供参考。

1 材料与方法

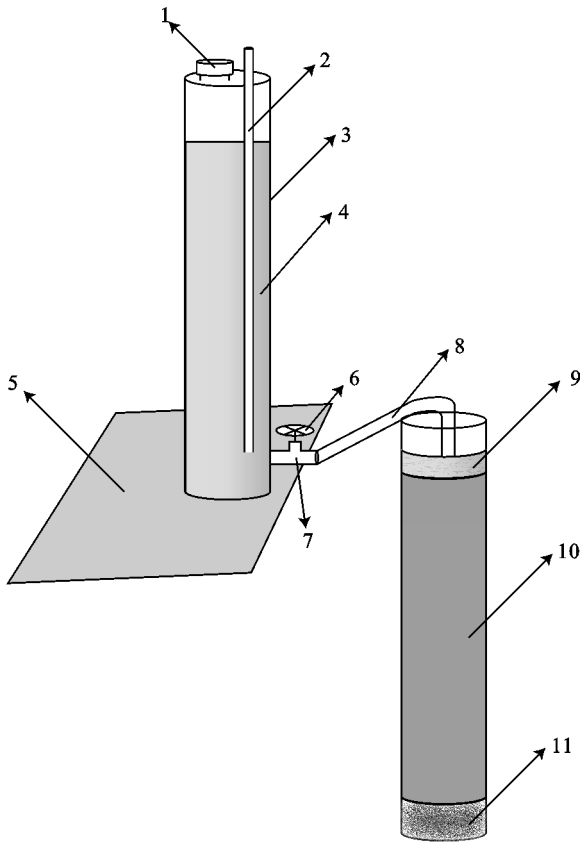
1.1 试验材料

供试土壤于 2021 年 3 月取自宁夏回族自治区西夏区兴庆公园(38°30'N, 106°8'E)表层土壤(0—40 cm),土壤质地为砂质壤土,样品经自然风干、剔除杂物、研磨后过 2 mm 筛备用。用环刀法测得土壤容重为 1.49 g/cm³,风干土初始体积含水率 1.61%。PAM 由巩义市热点净水材料有限公司提供,阴离子型,相对分子量为 2 000 万,白色粉末。

1.2 试验方法

试验于 2021 年 5 月在宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地进行,采用垂直一维土柱开展入渗试验(图 1)。根据参考文献^[5,13-14]确定施加比例,分别将 PAM 与供试土壤按 0%(CK), 0.02%(T_1), 0.04%(T_2), 0.06%(T_3), 0.08%(T_4)和 0.1%(T_5)的质量比混合均匀,每个处理重复 3 次。有机玻璃土柱内径 10 cm、高 50 cm、底部均匀分布直径 2 mm 排气孔。先于有机玻璃柱底部装填 5 cm 厚度的细石英砂并铺上纱布,然后将混合好的土壤样品按 1.49 g/cm³的容重每 5 cm 分层填装进土柱中,层与层之间进行打毛,以避免土壤分层,土柱总填装高度为 40 cm。土柱装填完成后在土壤表面覆一层滤纸,用直径 10 cm、高 50 cm 的马氏瓶对其进行供水,供水过程中保持水头为 3 cm 左右。供水开始后,记

录不同时间段马氏瓶水位和湿润锋运移距离。分时段记录湿润锋深度和马氏瓶水面高度,每次记录值均为土柱和马氏瓶四周均匀分布的4个刻度读数的均值。0—2 min,第一次观测于10 s,第二次观测于30 s,之后每隔30 s观测1次;2—10 min,每隔1 min观测1次;10—40 min,每隔5 min观测1次;40—60 min,每隔10 min观测1次;60 min之后,每隔30 min观测1次。当湿润锋读数达到40 cm时,停止供水并迅速排掉积水,于2.5,7.5,12.5,17.5,22.5,27.5,32.5,37.5 cm处的采集土壤样品,并用烘干法(105℃)测定质量含水量,并将其转换为土壤体积含水量。



注:1 进水口,2 进气管,3 马氏瓶,4 蒸馏水,5 桌面,6 出水口阀门,7 出水口,8 橡胶软管,9 恒定水头,10 土柱,11 细石英砂层。

图1 室内土柱试验装置示意图

1.3 入渗模型分析比较

本研究通过 Philip 模型^[18]、Horton 模型^[19]、Kostiakov 模型^[20]和通用经验模型^[4]对 PAM 施加下的城市绿地土壤入渗速率进行模拟,并比较不同入渗模型的适用性。

(1) Philip 模型公式:

$$i = 0.5St^{-0.5} + i_c \quad (1)$$

式中: i 为入渗速率(cm/min); S 为土壤吸渗率(cm/min^{0.5}); t 为时间(min); i_c 为稳定入渗速率(cm/min)。

(2) Horton 模型公式:

$$i = i_c + (i_1 - i_c)e^{-kt} \quad (2)$$

式中: i_1 为初始入渗速率(cm/min); k 为入渗模型参数;其他参数意义同前。

(3) Kostiakov 模型公式:

$$i = ct^{-d} \quad (3)$$

式中: c 表示初始入渗速率(cm/min); d 表征水分入渗速率衰退程度;其他参数意义同前。

(4) 通用经验模型:

$$i = q + ft^{-n} \quad (4)$$

式中: q 的绝对值表征稳定入渗速率(cm/min); f 的绝对值表征初始入渗速率(cm/min);其他参数意义同前。

1.4 Hydrus-1D 基本方程

Hydrus-1D 中,假设土壤各向同性均质介质,土壤水分以垂向运动为主,通过一维非饱和土壤水运动方程(Richards)和定解条件进行模拟^[21]。其方程为:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

土壤水分特征曲线 $\theta(h)$ 和土壤非饱和导水率 $K(h)$ 采用 van Genuchten-Mualem 模型。模型表示为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m]^2 \quad (7)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (8)$$

式中: $C(h)$ 为比水容量(cm); K_s 为饱和导水率(cm/min); $K(h)$ 为非饱和导水率(cm/min); S_e 为饱和度; θ_s 为土壤饱和含水量(cm³/cm³); θ_r 为滞留含水量(cm³/cm³); α 为进气吸力相关的参数(cm); m 和 n 为形状系数; t 为时间(min); z 为土层深度(cm),向下为正; h 为压力水头(cm)。

入渗试验过程中,定压力水头为模型上边界,自由排水作为模型的下边界。

初始条件:

$$h = h_0(z) \quad 0 \leq z \leq L \quad t = 0 \quad (9)$$

边界条件:

$$\begin{cases} h = h_1 & z = 0 & t \geq 0 & \text{上边界} \\ \frac{\partial h}{\partial z} = 0 & z = L & t > 0 & \text{下边界} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $h_0(z)$ 为初始压力水头(cm); h_1 为上边界定压力水头(cm); L 为土柱高度(cm)。

1.5 模型评价

利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)3个误差分析指标对反演所得参数进行正向拟合的结果进行评价^[22]。具体计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^m (\overline{M_i} - M_i)^2} \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (E_i - M_i)^2} \quad (12)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |E_i - M_i| \quad (13)$$

式中: E_i 表示模拟值; M_i 表示实测值; $\overline{M_i}$ 表示实测值得平均值; m 表示样本数量。

1.6 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 Origin 2018 软件作图和数据拟合, SPSS 22 软件进行数据分析, 通过单因素方差分析 (ANOVA) 和多重检验中的最小显著性差异法 (LSD) 确定各处理入渗速率间的差异性, 利用 R^2 , RMSE 和 MAE 对土壤水力学参数反演结果进行评价。

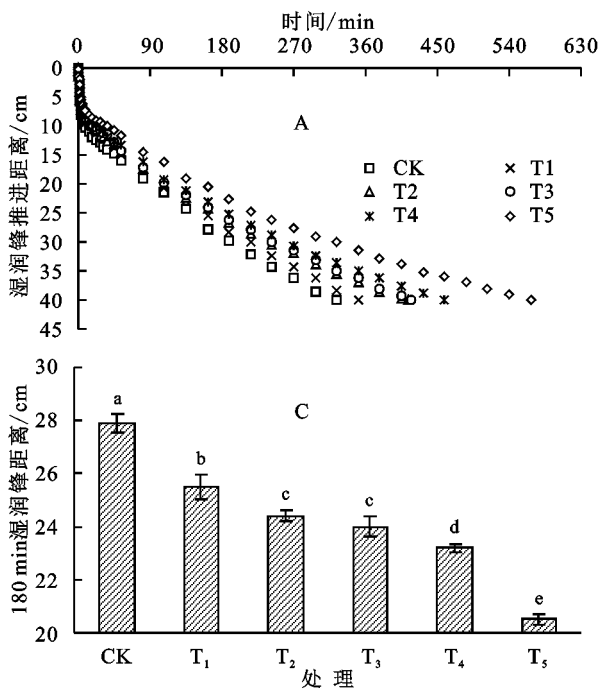


图2 PAM施加对湿润锋的影响

2.2 PAM 对累积入渗量的影响

由图3可知, 累积入渗量随PAM施加比例变化的趋势与湿润锋相似。0—90 min, 累积入渗量变化大, 各处理曲线区分不明显。同一时刻(90 min, 180 min 和 300 min)累积入渗量变化情况显示, 累积入渗量随PAM施量的增加而减小, 除 T_2 与 T_3 处理外, 其余各处理累积入渗量差异明显。入渗历时 300 min 时, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 和 T_5 累积入渗量较 CK 分别减少 5.9%, 12.8%, 14.7%, 21.4% 和 31.5%。相同时间, PAM 施加比例越大, 累积入渗量越小。CK 入渗时间最短, 为 360 min; T_5 处理入渗时间最长, 为 630 min。

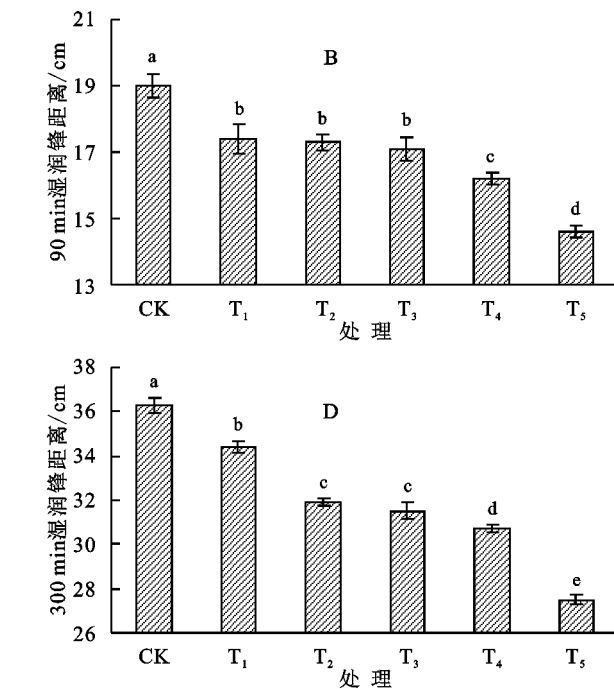
2.3 PAM 对入渗速率的影响

土壤入渗速率是表征土壤入渗能力的重要指标

2 结果与分析

2.1 PAM 对湿润锋的影响

不同 PAM 施加比例的湿润锋运移过程见图2所示, PAM 施加比例越大, 相同时间湿润锋推进距离越短。不同处理的湿润锋运移过程均呈现先快后慢的变化趋势。随着试验的进行, 湿润锋运移趋势变缓, 不同处理间的湿润锋运移差异逐渐明显, 入渗历时 300 min 时, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 和 T_5 处理湿润锋进程较 CK 分别减少 5.2%, 12.0%, 13.2%, 15.4% 和 24.2%。分别对前中后 3 个时刻(90 min, 180 min 和 300 min)的湿润锋运移距离进行分析。3 个时刻各处理湿润锋运移距离均随 PAM 施量的增加而减小, 其中 T_2 和 T_3 处理湿润锋运移距离无显著差异。



之一, 一般分为 3 个阶段: 瞬变阶段、渗漏阶段和稳定入渗阶段^[23]。图4为不同 PAM 施加比例的土壤水分入渗速率变化情况, 为更明显突出各处理之间的差异, 现将图4A 局部放大得到图4B, 即 15—240 min 时段的入渗速率。从图4B 可以看出, 土壤入渗速率随时间的推移逐步减小。开始的 6 min 内土壤入渗速率大、随时间推移迅速减小, 是瞬变阶段, 主要受分子力作用。6—120 min 间随入渗时间增加入渗速率逐渐减小且逐渐趋于平缓, 为渗漏阶段, 主要受毛管力和重力作用。120 min 后土壤入渗速率变化不明显即进入稳定入渗状态, 此阶段受重力作用。利用初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率表征土壤入渗过程(表1), 进一步分析不同 PAM 施加比例对

城市绿地土壤入渗速率的影响。从表中可知,各处理的 3 种土壤水分入渗指标变化规律均为初始入渗速率>平均入渗速率>稳定入渗速率,且各指标的值均随 PAM 施加比例的增大而减小:CK>T₁>T₂>T₃>T₄>T₅。T₁,T₂,T₃,T₄ 和 T₅ 处理的初始入渗速率比 CK 减少了 1.0%,1.6%,3.2%,9.0%和 12.1%,

稳定入渗速率较 CK 减少了 10.1%,22.4%,23.3%,29.2%和 41.6%。差异显著性分析结果显示(表 1),各处理初始入渗速率之间差异不显著;除 T₂ 与 T₃ 外,其余各处理间的稳定入渗速率均存在显著性差异($p<0.05$);各处理之间的平均入渗速率存在显著性差异($p<0.05$)。

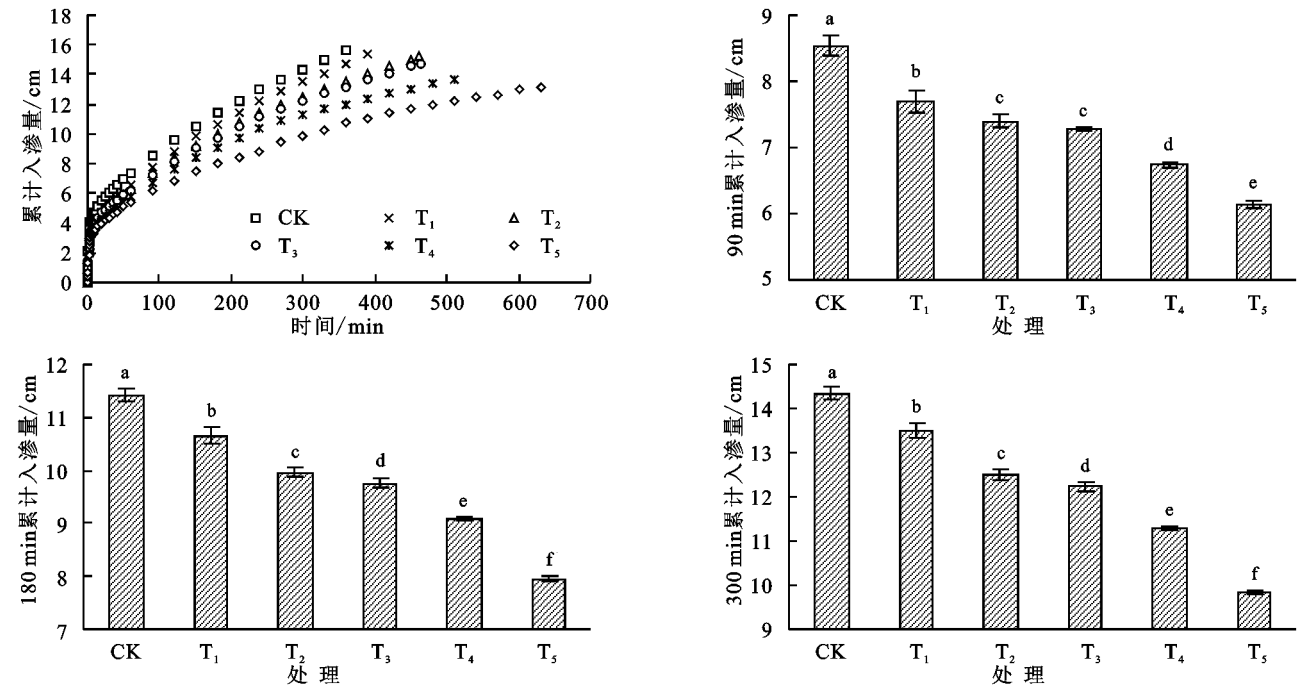


图 3 PAM 施加对累积入渗量的影响

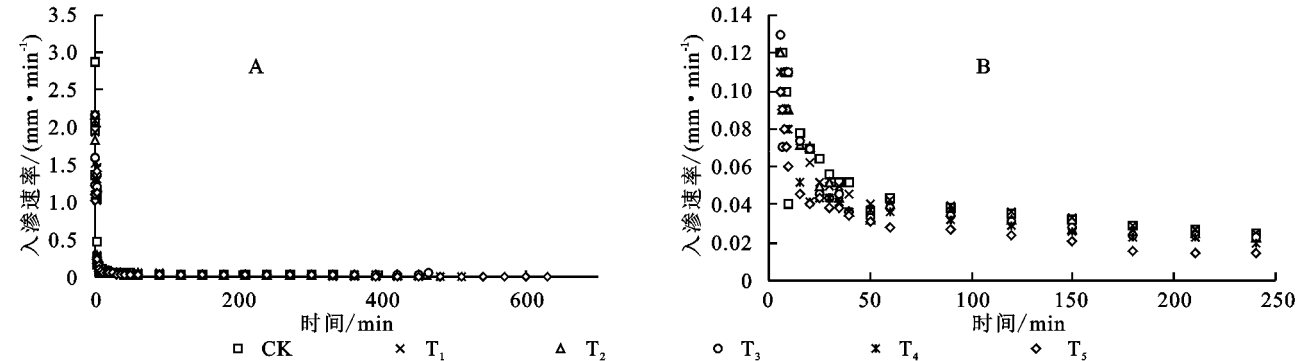


图 4 PAM 施加对入渗速率的影响

表 1 不同 PAM 施加比例对入渗速率的影响

处理	初始入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗速率/ (mm·min ⁻¹)
CK	10.589±1.339a	0.311±0.003a	0.436±0.003a
T ₁	10.488±1.101a	0.280±0.016b	0.393±0.004b
T ₂	10.425±0.395a	0.241±0.001c	0.330±0.003c
T ₃	10.250±0.213a	0.239±0.006c	0.324±0.003d
T ₄	9.638±0.184a	0.220±0.015d	0.268±0.001 e
T ₅	9.313±0.125a	0.182±0.002 e	0.209±0.001 f

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。

2.4 土壤水分入渗过程模型拟合

为进一步研究不同 PAM 施加比例下土壤水分

入渗过程,本文选用 Philip,Horton,Kostiakov 和通用经验模型对土壤入渗过程进行拟合,结果见表 2。在 Philip 模型中 R^2 均大于 0.829,土壤吸渗率 S 在 1.897~2.766。 S 值越大,表明入渗能力越强。 S 从大到小依次为 CK,T₁,T₂,T₃,T₄,T₅,即土壤水分入渗能力随 PAM 施加比例的增大而递减。表征稳定入渗率的 i_c 为负值与实际不符。Horton 模型中 R^2 在 0.886~0.991, i_c 表征稳定入渗速率, i_1 表征初始入渗速率,两者的值均随 PAM 施加比例的增大而减小,与表 2 结果一致。Kostiakov 模型中 R^2 均大于 0.817。参数 c 值在 0.823~1.157,表征初始入渗速率,其值随 PAM 施加比例的变化趋势与实测值变化

趋势一致,均随施加比例增大而减小,说明 PAM 能有效阻止水分入渗。参数 d 表征水分入渗速率衰退程度,其值在 T_4 至 T_5 处出现增大趋势,与实际不符。在通用经验模型中 R^2 值在 $0.825 \sim 0.895$, q 的绝对值表征稳定入渗速率,其绝对值随 PAM 施加比例的增大逐渐减小,符合实际情况。 f 的绝对值表征初始入渗速率,其变化趋势与实测值一致,随 PAM 施加比例增大不断减小。但通用经验模型为纯经验模型,各参数无物理意义。综合比较 R^2 , 各参数物理意义及模拟情况, Horton $>$ Kostiakov $>$ Philip $>$ 通用经验模型,因此 4 种经验模型中 Horton 模型拟合效果更优。

表 2 不同 PAM 施加比例下入渗率模型拟合

处理	Philip 模型			Horton 模型				Kostiakov 模型			通用经验模型			
	$S/$	$i_c/$	R^2	$i_c/$	$i_1/$	k	R^2	$c/$	d	R^2	$q/$	$f/$	n	R^2
	($\text{cm} \cdot \text{min}^{-0.5}$)	($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)		($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)			($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)			($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)		
CK	2.766	-0.161	0.898	0.039	3.104	0.582	0.991	1.157	0.576	0.881	-0.182	1.419	0.484	0.895
T_1	2.201	-0.109	0.867	0.037	2.491	0.558	0.987	0.957	0.550	0.850	-0.156	1.178	0.458	0.864
T_2	2.144	-0.097	0.873	0.033	2.368	0.518	0.976	0.942	0.548	0.858	-0.131	1.131	0.465	0.871
T_3	2.108	-0.091	0.858	0.031	2.368	0.518	0.956	0.933	0.544	0.844	-0.129	1.120	0.461	0.856
T_4	1.923	-0.080	0.829	0.021	1.981	0.433	0.898	0.852	0.546	0.817	-0.110	1.013	0.466	0.825
T_5	1.897	-0.081	0.845	0.018	1.970	0.456	0.886	0.823	0.570	0.836	-0.077	0.941	0.506	0.841

参数校准结果见表 3。由表 3 可以看出,滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 、形状系数 n 随 PAM 施加比例增加而增大,进气吸力倒数 α 和饱和导水率 K_s 随 PAM 施加比例的增加而减少。并用 R^2 , RMSE,

2.5 参数验证及 PAM 对土壤水力参数的影响

土壤水力参数是利用数学模型分析土壤水运动特征的基本参数,即定量了解土壤水分运动的基础^[24]。利用垂直一维积水入渗试验的累积入渗量资料,结合试验条件设定的初始和边界条件,运用 Hydrus-1D 的 inverse 模块对 van Genuchten-Mualem 模型中水力参数($\theta_r, \theta_s, \alpha, n, K_s$)进行反演^[25],参数 l 通常设为 0.5,并在此基础上通过调整参数值减小模拟值与土壤含水量实测值之间误差进行校准^[26]。其中模拟土层深度为 40 cm,空间步长为 0.5 cm,观测点布设于 2.5, 7.5, 12.5, 17.5, 22.5, 27.5, 32.5, 37.5 cm 处。

MAE 等 3 个指标对模拟结果进行评价。图 5 显示了含水率实测值与模拟值的对比结果,误差分析发现土壤含水率的 R^2 为 $0.878 \sim 0.991$, RMSE 值为 $0.014 \sim 0.024$, MAE 值为 $0.010 \sim 0.018$ 。

表 3 土壤水力学参数校准结果

处理	滞留含水率 $\theta_r/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 $\theta_s/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	进气吸力 倒数 $\alpha/(\text{cm})$	形状 系数 n	饱和导水率 $K_s/$ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
CK	0.018	0.433	0.279	2.050	0.026
T_1	0.020	0.435	0.216	2.502	0.024
T_2	0.020	0.438	0.195	2.635	0.020
T_3	0.030	0.443	0.144	2.690	0.018
T_4	0.040	0.451	0.054	2.780	0.007
T_5	0.048	0.471	0.033	2.850	0.001

3 讨论

各处理土壤水分入渗速率、湿润锋和累积入渗量曲线均呈现前期快速上升然后逐渐趋于平缓。入渗初始阶段曲线变化较快,这是由于土壤初始含水率低、基质势大,且 PAM 含有大量酰胺基等亲水性强的官能团加速吸水。随着入渗进程推进,各处理入渗速率逐渐降低,趋于稳定。主要原因是随着入渗进程推进,土壤基质势减小^[4],土壤吸力降低,入渗减缓;阴离子 PAM 通过阳离子桥与土壤颗粒相结合,且 PAM 水解后分子链延长在土壤颗粒周围形成一层网状结构,将土壤颗粒黏结在一起,同时 PAM 溶于水后粘滞性增强,最终致使入渗速率降低^[27-28]。入渗稳

定后,不同 PAM 施加量的湿润锋进程、累积入渗量差异逐渐明显,PAM 施加量越大,对湿润锋进程、累积入渗量抑制作用越强,哈丽代姆·居麦等^[12]和张春强等^[29]研究结果也与此一致。一定容积下,PAM 施加量越大,其在土体中分布密度也越大,PAM 水解后随水体一起向下运动,随时间推移 PAM 体积越发膨胀,将会堵塞更多的土壤孔隙,减少土壤有效孔隙度^[30],导致土壤水分入渗速度降低,使得湿润锋进程减缓、累积入渗量减小。本研究所用城市绿地土壤为砂壤土,土壤大颗粒较多、质地松散、孔隙结构大且团聚体少,水分下渗快,保水性能差,而 PAM 的施加有效地抑制水分下渗过程,有助于城市绿地土壤水分的保持。

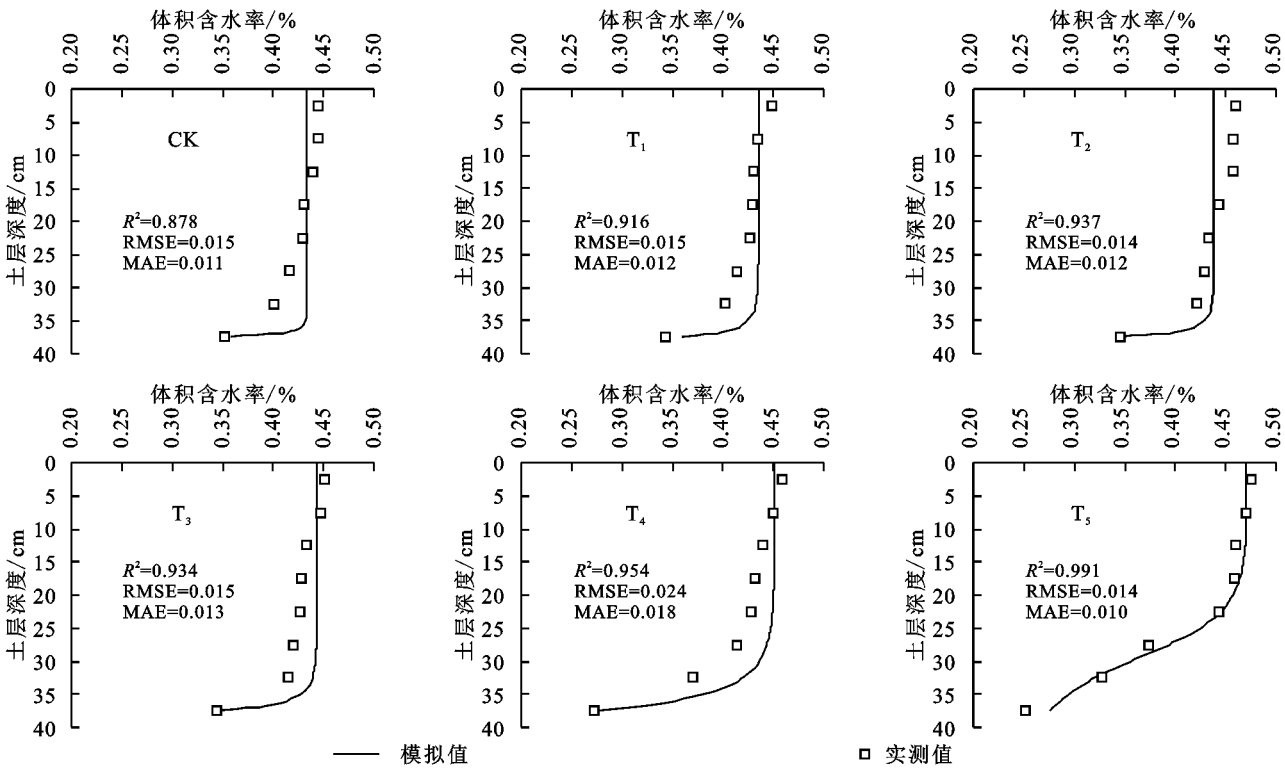


图 5 土壤含水率分布模拟值与实测值对比

本文所选 4 种入渗模型中,Horton 模型 R^2 最大,且参数 i_c, i_1 均具有物理意义, i_c 接近实测值,因此本研究该模型拟合效果更优。这与王幼奇^[4]、魏恒^[31]和武敏^[32]等在土壤水分入渗模型的研究中得出结果一致。Philip 模型求出的 i_c 为负值与实际不符,且 R^2 值比 Horton 小,故此模型拟合效果较差。Kostiakov 模型相比 Horton 模型模拟的初始入渗速率更贴近实测值,但 d 值在 T_4 至 T_5 处变化趋势不符合实际,且 R^2 值均小于 Horton,因此 Kostiakov 模型模拟效果相比较差。通用经验模型 q 为负值,且为经验模型,不能得出反映土壤入渗能力的物理参数,同时 R^2 小于 Horton。综上,Horton 模型能更好地模拟 PAM 施加下的城市绿地土壤水分入渗过程。

Hydrus-1D 反演参数正向模拟结果及评价指标结果显示,模拟值与实测值之间的差异较小。由模拟结果可知,PAM 施加量越大,模型模拟效果越好,其原因主要为入渗速度较慢,模拟时间较长,反演数据更多,对水分运动及再分配过程模拟更为精准。根据单鱼洋等^[8]的研究,本模拟结果满足精度要求,可应用于模拟施加 PAM 的银川城市绿地土壤水分入渗研究。 θ_r, θ_s 和 n 增大和进气吸力倒数 α 减小的原因是 PAM 所具有的链状高分子特性在其溶于水后发挥作用,使得土壤颗粒黏结,土壤团聚体增多,大孔隙减少,比表面积增大,土壤持水能力增强^[16]。饱和导水率 K_s 减少的原因是 PAM 水解后形成的絮状凝胶

极大地增加了水的粘滞性,使得水分在土壤中运移的能力大幅减弱^[27]。

4 结论

(1) 相同入渗历时,PAM 处理土壤水分稳定入渗率、累积入渗量及湿润锋运移距离等水分垂直入渗特征参数均小于 CK,且 PAM 施加比例越大,特征参数值越小,其中 T_5 效果最明显,其稳定入渗率减小了 41.6%。本研究表明,PAM 有效降低了银川城市绿地土壤入渗速度,且 PAM 施加比例越大,阻渗作用越明显。

(2) 分析比较 Philip,Kostiakov,Horton 和通用经验模型 4 种入渗模型在本试验中的拟合结果,其中 Horton 模型拟合效果较好($R^2>0.886$),能较精准描述 PAM 施加下的银川城市绿地土壤水分入渗过程,在本研究中适用性较好。

(3) 利用 Hydrus-1D 反推土壤水力参数得知,PAM 含量与滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 、形状系数 n 呈正相关关系,与进气吸力倒数 α 、饱和导水率 K_s 呈负相关关系,进一步表明 PAM 具有减渗保水的作用。

参考文献:

[1] 张昌顺,谢高地,鲁春霞,等.北京城市绿地对热岛效应的缓解作用[J].资源科学,2015,37(6):1156-1165.
[2] 高吉喜,宋婷,张彪,等.北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响[J].资源科学,2016,38(6):1028-1038.

- [3] 郑国保,张源沛,孔德杰,等.不同灌溉定额对枸杞土壤水分动态变化规律的影响[J].西北农业学报,2012,21(2):117-120.
- [4] 王幼奇,包维斌,赵云鹏,等.生物炭添加对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(12):60-65.
- [5] 张妙,李秧秧,白岗栓.生物炭和 PAM 共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):124-130.
- [6] 李晓菊,单鱼洋,王全九,等.腐殖酸对滨海盐碱土盐运移特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):288-293.
- [7] 杜学军,闫彬伟,许紫峻,等.脱硫石膏对苏打盐碱土水盐入渗过程的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(3):179-183.
- [8] 单鱼洋,马晨光,王全九,等.羧甲基纤维素钠对壤砂土水分运动及水力参数的影响[J].土壤学报,2022,59(5):1349-1358.
- [9] 陆绍娟,王占礼.土壤改良剂聚丙烯酰胺的研究进展[J].人民黄河,2016,38(7):73-77.
- [10] 王丽,王力,王全九. PAM 对不同坡度坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].环境科学学报,2015,35(12):3956-3964.
- [11] 杨永辉,武继承,赵世伟,等. PAM 的土壤保水性能研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(12):120-124.
- [12] 哈丽代姆·居麦,宁松瑞,王全九,等.施加 PAM 与 CMC 对土壤水分入渗与蒸发特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):121-127,134.
- [13] 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.
- [14] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究[J].土壤学报,2016,53(4):1056-1064.
- [15] 王晨光,郝珊,陆思旭,等.添加 PAM 对城市绿地换填介质性质的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):356-361.
- [16] 郝珊,王晨光,张阿凤,等.不同物料配比对城市绿地土壤渗透性及污染物净化效果的影响[J].应用生态学报,2020,31(4):1349-1356.
- [17] 马笑,王晨光,郝珊,等.聚丙烯酰胺和椰糠配合对绿地土壤换填介质渗、蓄、净的效果[J].地球环境学报,2020,11(1):112-118.
- [18] Philip J R. The theory of infiltration;1. The infiltration equation and its solution[J]. Soil Science, 1957,83(5):345-358.
- [19] 包维斌,白一茹,赵云鹏,等.生物炭添加对宁夏中部旱区土壤水分入渗及持水性的影响[J].土壤通报,2018,49(6):1326-1332.
- [20] Mehuys G R, Stolzy L H, Letey J, et al. Effect of stones on the hydraulic conductivity of relatively dry desert soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975,39(1):37-42.
- [21] 周晓冰,栾永霞,林青,等.数值反演模型模拟层状土壤水力性质[J].土壤学报,2021,58(5):1214-1223.
- [22] 张育华,周蓓蓓,陈晓鹏,等.基于 Hydrus 模拟纳米碳对黄土坡面土壤水分运动特征的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):132-138.
- [23] 白一茹,张兴,王幼奇,等.不同残膜含量对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):227-235.
- [24] 刘建军,王全九,王卫华,等.利用 Hydrus-1 D 反推土壤水力参数方法分析[J].世界科技研究与发展,2010,32(2):173-175.
- [25] 马蒙蒙,林青,徐绍辉.不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J].土壤学报,2020,57(2):347-358.
- [26] 朱超凡,黄金柏,顾准,等.基于 HYDRUS-1 D 的城市草地土壤水分模拟:以扬州市人工草地为例[J].水土保持通报,2021,41(3):118-126.
- [27] 韩冬,魏占民,于健,等.干粉 PAM 溶解时间对土壤饱和和导水率的动态影响[J].土壤,2016,48(2):368-373.
- [28] Sirjacobs D, Shainberg I, Rapp I, et al. Polyacrylamide, sediments, and interrupted flow effects on rill erosion and intake rate[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64(4):1487-1495.
- [29] 张春强,冯浩. PAM 和尿素混施对土壤入渗特性的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):109-113,135.
- [30] 曹雨桐,余冬立.施用生物炭和聚丙烯酰胺对海涂围垦区盐碱土水力性质的影响[J].应用生态学报,2017,28(11):3684-3690.
- [31] 魏恒,赵成义,孙栋元.塔里木河上游绿洲典型地表特征土壤水分入渗性能研究[J].冰川冻土,2010,32(4):837-843.
- [32] 武敏,冯绍元,孙春燕,等.北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究[J].中国农业大学学报,2009,14(4):98-102.