

基于不同模型的浑水灌溉土壤入渗模拟研究

孙黎强

(滨州市引黄灌溉服务中心, 山东 滨州 256600)

【摘要】模拟计算是水力学研究的重要手段,而构建和选择合适的数学模型,对提高模拟精度和结果的有效性具有重要意义。文章采用室内试验与模拟计算结果进行对比分析的方式,探讨了常用模型在浑水灌溉土壤入渗方面的模拟效果。结果显示,研究中选择的4种常用模型均有较高的模拟精度,并以Green-Ampt模型的模拟效果最佳。模型在清水条件下的模拟精度最高,而浑水中的泥沙含量越高,模型的模拟精度越低。文章采用的方法和获取的结论可以为相关研究及工程建设提供理论层面的支持和借鉴。

【关键词】浑水灌溉;土壤入渗;累积入渗量;湿润锋

【中图分类号】S152.7

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-01-0055-05

Study on Simulation of Soil Infiltration Under Turbid Water Irrigation Based on Different Models

SUN Liqiang

(Yellow River Diversion Irrigation Service Center of Binzhou Municipality, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: Simulation calculation is an important means in hydraulics research, and the construction and selection of appropriate mathematical models are of great significance for improving simulation accuracy and result effectiveness. This paper explores the simulation effects of common models in the field of soil infiltration under turbid water irrigation by means of comparative analysis between indoor test results and simulation calculation results. The results show that the 4 selected common models in the study all have high simulation accuracy, among which the Green-Ampt model achieves the best simulation effect. The simulation accuracy of the models is the highest under clear water conditions, while the higher the sediment content in turbid water, the lower the simulation accuracy of the models. The methods and conclusions can provide theoretical support and reference for relevant research and engineering construction.

Key words: Turbid water irrigation; Soil infiltration; Cumulative infiltration; Wetting front

我国北方干旱和半干旱地区河流含沙量较大,夏季汛期尤其如此,该地区灌区利用浑水灌溉的现象比较普遍。多年来的研究和灌溉实践均证明,浑水灌溉不仅可以有效缓解水资源供需矛盾,还可以在一定程度上改善土壤结构,提高土壤肥力,有利于农作物的增产增收^[1]。浑水中含有的悬浮物和盐分等物质,会显著改变土壤的入渗特征,长期使用浑水灌溉会导致土壤本身产生不同程度的斥水性,土壤的入渗能力会受到一定程度的影响。关于土壤入渗特征,部分学者展开了深入研究和分析,获得了诸多有价值的研究结

论,特别是一些有良好的模拟效果的入渗模型^[2]。当然,这些模型一般针对清水展开,且缺乏对比分析。基于此,该次研究利用试验的方式比较常用入渗模型在浑水灌溉条件下的适用性,为浑水灌溉在农业灌溉领域的应用提供理论支持。

1 室内试验设计

1.1 试验材料

试验中从山东引黄灌区采集耕地地表0~30 cm

收稿日期:2025-09-13

作者简介:孙黎强(1982—),男,工程师

的耕作层表层土作为试验土样。对采集的试验土样风干后研磨,混合并过 2 mm 筛,以去除植物根系、砾石等杂物。利用 pH 试纸、激光粒度仪、环刀法和烘干法测试土壤的物理性质,具体见表 1。

表 1 土样物理性质

土壤质地	颗粒组成/m			容重/(g·cm ⁻³)	pH 值	水力参数		
	<0.002	0.002~0.02	>0.02			持水率/%	饱和含水率/%	饱和导水率/(cm·min ⁻¹)
黏壤土	17.03	43.15	37.44	1.34	7.3	0.25	0.47	0.013

制^[2]。因此,试验中采用自来水中加入泥沙的方式配置不同泥沙含量的浑水。根据灌区取水口水质监测数据,泥沙含量在 0.5%~3.2% 波动,因此在试验中,配置泥沙含量分别为 1%、2% 和 3%,3 种不同泥沙含量的浑水分别记作 S1、S2、S3。

1.2 试验装置与方法

结合研究目的和实验条件,采用一维垂直积水入渗试验方式。试验装置为自行设计,主要由土柱、供水设备以及支架构成。其中试验土柱容器为内径 120 mm、高 1 000 mm 的有机玻璃桶,装土高度为 600 mm,土柱下部设置透气底板。装置的供水设备为马氏瓶,内径为 100 mm,高 800 mm,土柱和马氏瓶的外壁均标有刻度,便于试验中读数。试验装置结构如图 1 所示。

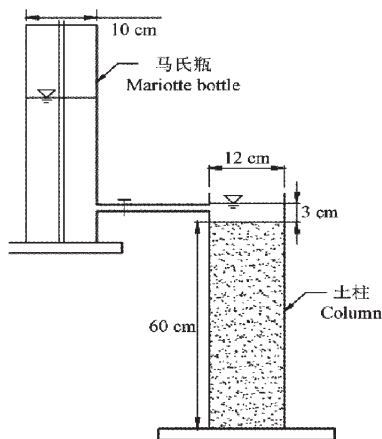


图 1 试验装置结构示意图

试验中将土样装入试样桶,每次加入的厚度为 50 mm,分层加入并击实,使其和取样地的容重相同。在击实一层后要刮毛表面再填下一层,避免土壤分层影响试验结果。土样装填完毕后要静置 24 h 方可实验。在试验中首先打开阀门,利用马氏瓶向土柱供水,供水水头调节为 30 mm。试验过程中要记录好湿润锋运移数据和马氏瓶内的水位数据,试验时长为 400 min。为了保证试验结果的准确性,每种入渗试验需要重复进行 3

次,并取 3 次试验结果的均值。

1.3 数据处理与分析

数据处理过程中的使用 Excel 2010 进行函数计算,利用 Origin Pro 2016 进行图表绘制,利用 SPSS 22.0 进行统计分析。为了有效评估模型模拟结果和实际试验结果的接近程度,研究中采用 MAE(平均绝对误差)作为模拟效果的量化评价指标。

2 模拟模型与方法

2.1 模拟模型选择

选择土壤入渗研究领域比较常用的 4 个模型进行对比,探讨其在浑水灌溉领域的实用性。

1)Hydrus-1D 模型。该模型是一款用于饱和带及多孔介质中水分、热量及溶质运移的数值模拟模型,可以较好模拟水分、溶质在土壤中的运移规律^[3]。鉴于灌区特别是取样灌区灌溉仍旧以大水漫灌为主,在灌溉过程中地表会暂时形成一个厚度较大的水层,一维垂向入渗是水流入渗的主要形式。因此,该模型的模拟过程中采用修正 Richards 方程对水分运动进行描述。试验在室内进行,不考虑植物根系的影响,模型的数学表达式如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(h) \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} + 1 \right)] \quad (1)$$

式中: θ 为土样的体积含水率,%; t 为试验时间,min; z 为垂向深度,cm; K 土样的非饱和导水率,cm; h 试验水头,cm。

2)Kostiakov 模型。该模型属于一种针对土壤入渗的二参数经验模型,具有物理意义简单、计算方便的特点,在目前土壤入渗研究领域应用较为广泛^[4]。该模型的数学表达式为:

$$I(t) = Kt^n \quad (2)$$

式中: $I(t)$ 为 t 时刻试验土样的累积入渗

量,cm; K 为渗透系数, n 为入渗系数,主要表征土壤入渗速度的衰减系数,无量纲。

3) Green-Ampt 模型。该模型是最常见的土壤入渗模型之一,不仅具有十分坚实的理论基础,同时也广泛应用于各个领域^[9]。模型假设土壤入渗过程中具有比较明显的湿润锋,进而将土层划分为饱和、非饱和两个主要区域,入渗过程中的水分运移规律利用达西定律描述,该模型的数学表达式如下:

$$i(t)=K_s \frac{Z_f+S_f+H}{Z_f} \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率,cm/min; K_s 为饱和导水率,cm/min; Z_f 湿润锋运移深度,cm; S_f 湿润锋面基质吸力,cm; H 为土壤表层积水深度,cm。

4) Philip 模型。该模型属于半理论半经验性模型,可以较好描述土壤的垂直入渗过程,数学表达式如下:

$$I=St^{0.5}+At \quad (4)$$

式中: I 为入渗量,cm; S 为吸渗率,cm·min^{-1/2}; t 为入渗时间,min; A 为稳渗率,cm/min。

2.2 边界条件

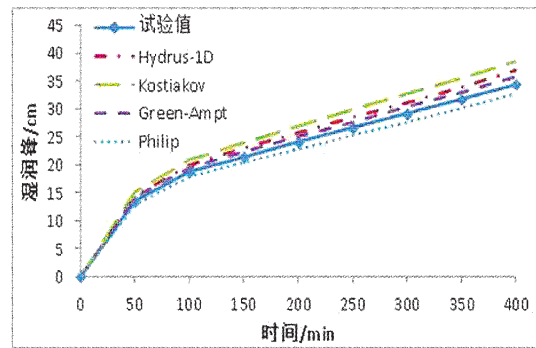
将模拟计算设置为一维积水入渗实验,上部为压力水头边界条件,设置为 30 mm 恒压水头;模型的下边界为也为恒压水头,为-1 000 mm。模拟区域的土层深度为 600 mm。计算过程中不考虑土壤蒸散发和植物根系的吸水作用。

3 计算结果与分析

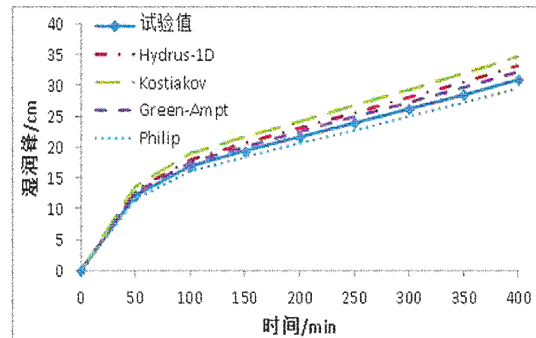
3.1 湿润锋

利用上文提出的 4 个计算模型对不同试验用水方案下的湿润锋进行模拟计算,并将计算结果和试验结果进行对照,绘制出不同试验用水方案湿润锋变化曲线,结果如图 2 所示。

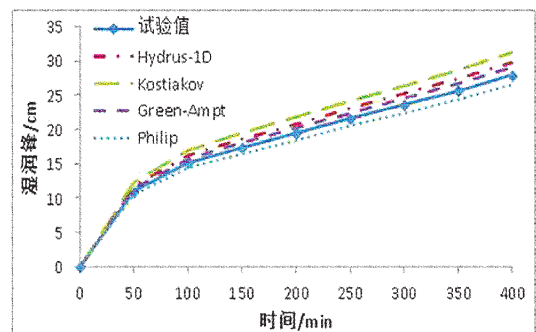
从图 2 可以看出,4 种计算模型的计算结果与试验结果比较接近,曲线的走势也相对一致。说明这 4 种模型在用于浑水灌溉入渗过程中的湿润锋计算时可以获得较高的精度和良好的模拟效果。具体来看,各方案条件下的湿润锋均呈现出先迅速增大后平稳增大的变化趋势。清水试验条件下的湿润锋变化速率最快,随着水中泥沙含量的增加,相同时间节点的湿润锋逐渐减小。由此可见,采用浑水灌溉会显著影响湿润锋的移



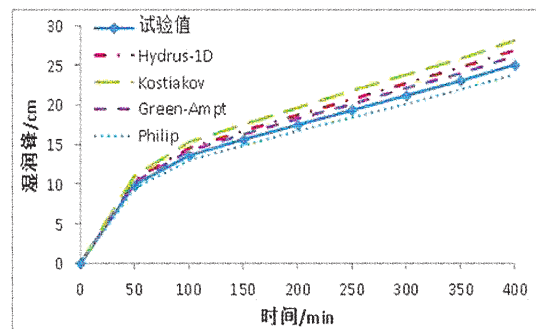
(a) S0



(b) S1



(c) S2



(d) S3

图 2 不同试验方案湿润锋变化曲线

动,原因是浑水中的泥沙颗粒在入渗过程中会淤积在土壤表面,导致渗流通道淤堵。Philip 模型的计算结果较试验结果偏小,其余 3 种模型的计算

结果较试验结果偏大。整体来看,与试验结果最接近的是 Green-Ampt 模型,其次是 Philip 模型,再次是 Hydrus-1D 模型,Kostiakov 模型的偏差最大。

为了进一步量化对比各模型的计算精度,研究中以试验数据和模拟计算数据为依据,计算获取不同模型在不同试验方案下的 MAE 值,结果见表 2。从计算结果来看,MAE 均值最小的是 Green-Ampt 模型,其次是 Philip 模型和 Hydrus-1D 模型,Kostiakov 最大。由此可见,MAE 值的计算结果反映出与湿润锋计算结果相同的结论,模拟效果最佳的为 Green-Ampt 模型。整体来看,各模型对清水方案的模拟效果最佳,对浑水方案的模拟结果相对较差,且泥沙含量越大模拟效果越差,原因可能与模型本身的开发以清水为基础有关。

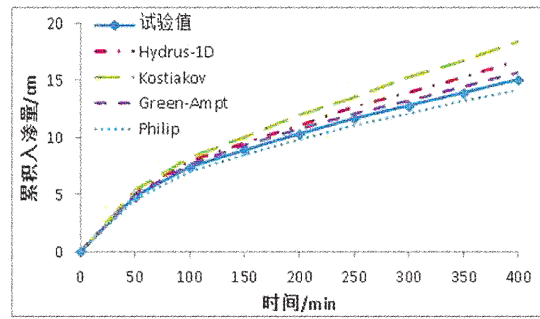
表 2 不同计算模型湿润锋 MAE 值计算结果

试验模型	Hydrus-1D	Kostiakov	Green-Ampt	Philip
S0	1.25	1.51	0.71	1.03
S1	1.33	1.62	0.80	1.07
S2	1.32	1.77	0.84	1.22
S3	1.56	1.85	1.06	1.29
均值	1.37	1.69	0.85	1.15

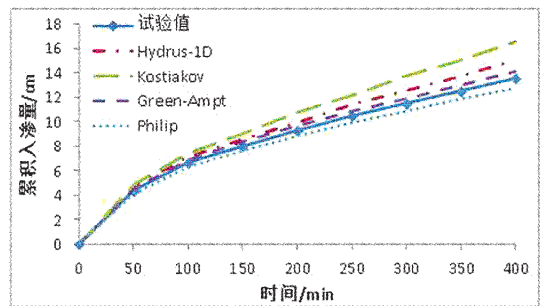
3.2 累积入渗量

利用 4 个计算模型对不同方案下的土壤试样的累积入渗量进行模拟计算,并绘制出累积入渗量变化曲线,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,累积入渗量的变化特征与湿润锋类似。一是各计算模型的计算结果与试验结果比较接近,曲线的走势也相对一致;二是清水试验条件下的累计入渗量相对较大,随着水中泥沙含量的增加,相同时间节点的累积入渗量逐渐减小,说明浑水灌溉会对土壤试样的累积入渗量产生比较显著的影响;三是从不同计算模型的计算结果对比来看,Philip 模型的计算结果较试验结果偏小,其余 3 种模型的计算结果较试验结果偏大,与试验结果最接近的是 Green-Ampt 模型,其次是 Philip 模型,再次是 Kostiakov 模型,Hydrus-1D 模型的偏差最大。

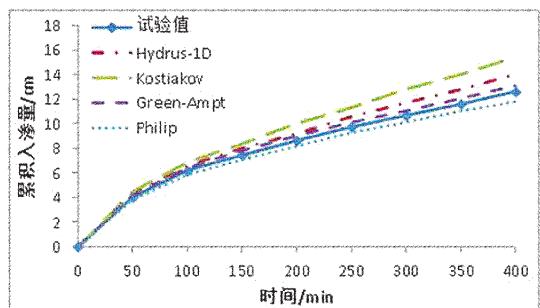
为了进一步量化对比各计算模型在累积入渗量上的模拟效果,计算获取不同模型在不同试验方案下的 MAE 值,结果见表 3。从计算结果来看,各计算模型累计入渗量的 MAE 变化规律与



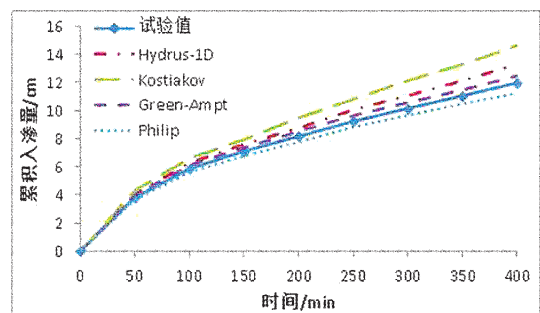
(a) S0



(b) S1



(c) S2



(d) S3

图 3 不同试验方案累积入渗量变化曲线

表 3 不同计算模型累积入渗量 MAE 值计算结果

试验方案	Hydrus-1D	Kostiakov	Green-Ampt	Philip
S0	1.26	1.55	0.79	1.13
S1	1.39	1.81	0.93	1.17
S2	1.37	2.06	0.98	1.28
S3	1.66	2.45	1.16	1.34
均值	1.42	1.97	0.97	1.23

湿润锋类似:1)MAE 均值最小的是 Green-Ampt 模型;其次是 Philip 模型和 Hydrus-1D 模型, Kostiakov 模型的均值最大,进一步说明对累积入渗量模拟效果最佳的为 Green-Ampt 模型。2)各模型对清水方案的模拟效果最佳,对浑水方案的模拟结果相对较差,且泥沙含量越大模拟效果越差。其中 Hydrus-1D 模型 S1、S2 方案不符合上述规律,原因可能与室内试验中的数据误差有关。

4 结 语

研究利用室内试验和模拟计算对比的方式,探讨常见土壤入渗计算模型在浑水灌溉领域的应用效果。获得的结论对相关理论研究和工程应用具有指导和借鉴作用。当然,受诸多因素的影响,此次研究也存在诸多不足之处,特别是研究中选择的土壤类型比较单一,选择的评价指标不够丰富,也没有考虑浑水中泥沙粒径和级配等因

素的影响。在后续研究中,需要引入更多的变量进行分析,以获得更丰富、更可靠的结论。

参考文献

- [1] 彭有亮,费良军,介飞龙,等.浑水灌溉和有机肥对土壤水分运移、蒸发及淋溶的影响[J].农业工程学报,2023,39(14):125-135.
- [2] 郁耀闯,杨树瑶,王长燕,等.宝鸡地区 L1-S5 黄土和古土壤水分入渗及影响因素[J].水土保持研究,2023,30(6):78-85.
- [3] 雷磊,王晓东,郑树海,等.基于 HYDRUS-1D 模型的黄土积雨入渗数值模拟研究[J].人民黄河,2024,46(7):138-142.
- [4] 蒋水华,刘贤,黄劲松,等.多层非均质边坡降雨入渗分析的改进 Green-Ampt 模型[J].岩土工程学报,2024,46(6):1177-1186.
- [5] 薛少欣,薛万来.水泥掺入砂质土壤入渗性能影响的试验研究[J].陕西水利,2020(1):9-11,19.

(责任编辑 崔亚男)

(上接第 54 页)

3)土工格栅铺好后,及时分层铺设上层填料,按照设计要求填筑堤防,完成碾压,使压实度达到设计标准。施工完成后,及时对土工格栅铺设质量和堤防压实度进行全面检测,确保符合设计和规范要求。

4 工程观测设施

为掌握堤基处理段堤身沉降及位移情况,及时发现安全隐患并采取针对性加固、维护措施,根据现场实际条件,科学合理地在处理后的堤身断面上布设观测点。考虑左堤桩号 206+600 处位于淤泥层厚度较大且地质条件复杂区域,易出现不均匀沉降和侧向位移,确定该断面为关键观测断面,该断面设置 4 个位移标点,背水侧堤角外设 1 个位移基点,为堤防工程的长期安全运行提供可靠数据支撑。

5 结 语

堤基处理后,该段堤防填筑修建防汛管理道

路,经过为期 2 年的运行监测,其运行状态良好,未出现裂缝、沉降等问题。抛石挤淤方案在该感潮河段得以成功应用,充分彰显了其在降水困难区域的优势。因为临近入海口,河道受潮水顶托,地下水位长期处于高水位状态,常规的降水措施难以实施。抛石挤淤通过机械抛填未风化石料,借助石料自身的重力和冲击力将淤泥挤出,从而有效降低了土体的含水量,并且石料能够立即提供承载能力,与换填素土方案相比,可以缩短施工周期。在 2023—2024 年汛期,该段堤防经受了考验,堤身及防汛道路均未出现异常变形,验证了抛石挤淤方案在感潮河段复杂水文地质条件下的可靠性,为同类工程建设提供宝贵的经验。

参考文献

- [1] 山东省水利勘测设计院.小清河防洪综合治理工程初步设计(代可研)[R].2019.
- [2] 彭慧,刘璐,姜钧耀,等.感潮河段上游洪水与河口潮位遭遇研究[J].人民黄河,2021,43(8):44-47.
- [3] 胡永安,孙立宏.抛石挤淤地基处理法在饱和淤泥基础中的应用[J].陕西水利,2010(4):66-67.

(责任编辑 赵其芬)