

河床质对浑水入渗-堵塞过程影响与入渗模型改进

苗庆远¹, 潘成忠^{1,2}, 刘聪敏¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: [目的] 河床物理堵塞是季节性河流的常见问题, 对地下水补给和河流生态修复具有重要影响, 分析季节性河流的入渗和堵塞特征, 预测河床脱节后的入渗速率, 为后续河流生态修复和补水方案优化提供科学依据。[方法] 以永定河下游为参考河段选择5种河床质为入渗介质, 中值粒径(d_{50})分别为50、100、150、300、600 μm , 利用6 g/L的浑水开展一维土柱下渗模拟试验, 分析河床堵塞特征与饱和流-非饱和流转化规律, 研究建立考虑物理堵塞影响的河床入渗过程预测模型。[结果] 1) 中值粒径为50 μm 的细颗粒河床未发生明显堵塞, 100~600 μm 河床发生堵塞的深度为0~5 cm, 渗透系数较初始值分别下降86%、68%、93%、94%。2) 50 μm 河床入渗全程为饱和渗流, 100~600 μm 河床大约在2.6~51.2 h由饱和渗流转化为非饱和渗流, 入渗速率降幅约为15%~30%。3) 构建基于达西定律与粗颗粒渗流公式的考虑堵塞影响的河床入渗模型, 模型验证表明, 4种粗颗粒(100~600 μm)河床入渗速率的相对误差分别为8.6%、14.7%、22.1%、36.6%, 并随中值粒径的增大而增大。[结论] 浑水中细泥沙对粗质地河床堵塞影响较大, 河床质地越粗, 越容易转为脱节河床。科学认识细泥沙在不同质地河床的下渗-堵塞规律, 对后续优化生态补水方案具有重要意义。

关键词: 入渗; 河床堵塞; 渗流转化; 变渗透系数; 模型

中图分类号: TV139.14

文献标识码: A

Influence of Riverbed Sediments on Infiltration-Clogging Process of Muddy Water and Improvement of Infiltration Model

MIAO Qingyuan¹, PAN Chengzhong^{1,2}, LIU Congmin¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] Physical clogging of riverbeds is a common problem in seasonal rivers, significantly affecting groundwater recharge and river ecological restoration. This study analyzes the infiltration and clogging characteristics of seasonal rivers, predicts the infiltration rates after riverbed disconnection, and provides scientific support for optimizing river ecological restoration and water replenishment schemes. [Methods] Taking the lower reaches of the Yongding River as a reference, five types of riverbed sediments with median particle sizes d_{50} of 50, 100, 150, 300, and 600 μm were selected as experimental media. One-dimensional soil column infiltration simulation tests using 6 g/L muddy water were conducted to analyze the riverbed clogging characteristics and the transformation pattern from saturated to unsaturated flow. A prediction model for riverbed infiltration, considering the influence of physical clogging, was developed. [Results] 1) For fine particle riverbed with a median particle size of 50 μm , no significant clogging occurred. For riverbeds with particle sizes ranging from 100 to 600 μm , clogging occurred at a depth of 0 to 5 cm, and the hydraulic conductivity decreased by 86%, 68%, 93%, and 94%, respectively, compared to the initial values. 2) The 50 μm riverbed maintained saturated seepage

收稿日期: 2025-02-15

修回日期: 2025-03-20

录用日期: 2025-03-28

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077059)

第一作者: 苗庆远(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 202421470022@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 潘成忠(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: pancz@bnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

throughout infiltration. For riverbeds with particle sizes ranging from 100 to 600 μm , the flow transformed from saturated to unsaturated seepage within 2.6 to 51.2 hours, with infiltration rates decreasing by approximately 15% to 30%. 3) A riverbed infiltration model considering clogging effects was constructed based on Darcy's law and the seepage formula for coarse particles. Model validation showed that the relative errors of the infiltration rates for four coarse-particle riverbeds (100-600 μm) were 8.6%, 14.7%, 22.1%, and 36.6%, respectively, and increased as the median particle size increased. [Conclusion] Fine sediment in muddy water has a significant impact on the clogging of coarse-textured riverbeds. The coarser the riverbed texture, the more likely it is to transform into a disconnected riverbed. A scientific understanding of the infiltration-clogging behavior of fine sediment in riverbeds of different textures is essential for optimizing ecological water replenishment schemes.

Keywords: infiltration; riverbed clogging; seepage transformation; variable permeability coefficient; model

Received: 2025-02-15

Revised: 2025-03-20

Accepted: 2025-03-28

季节性河流占全球河网长度的 1/2 以上,尤其在干旱、半干旱地区较为常见^[1]。与全年流量稳定的常年性河流不同,季节性河流反复停止流动或干涸沙化^[2]。以我国北方永定河为例,在 2000—2019 年,永定河年平均径流量仅为 1.67 亿 m^3 ,远不能满足河道正常需水,甚至出现连续断流现象^[3]。因此,自 2019 年起,北京市对永定河实施生态补水工作,极大地缓解了永定河缺水断流的现象。

对季节性河流补水过程中,部分水量通过河床渗漏补给地下水,增加地下水储蓄量,有助于恢复地下水生态系统^[4]。但有研究^[5]表明,强烈的河道渗漏损失降低河道水头行进速率,影响下游河段补水效率。目前大部分生态补水优化方案主要以不同河段水力学条件为基础进行研究,模型围绕河道初始条件、糙率及渗漏系数构建,难以确定河道流量和渗漏变化的内在驱动因素,较少考虑河道泥沙的影响。永定河上游经过黄土高原,水土流失使得河流泥沙含量较高^[6],而细泥沙常作为悬浮荷载被运输^[7],当进入下游平原河段时,河道变宽及河流流速减缓,细颗粒泥沙逐渐沉积在河床表面或填充孔隙^[8],从而引发河床物理堵塞。而河床渗透系统需要具有渗透性的表层土壤,以保证较高的渗透速率,黏土层和其他细纹理物质可过度限制河流水向下流动,河床表面几毫米的细颗粒沉积物也会使得入渗速率下降 3~8 倍^[9]。

针对入渗过程的物理堵塞问题,众多研究者通过室内土柱试验,在浑水灌溉^[10-11]、地下水人工回灌^[12]及水利工程反滤设计^[13]方面开展的研究发现,浑水入渗过程中,泥沙颗粒沉积在土壤表面,形成一层致密的堵塞层^[14],从而阻碍水分入渗,减小入渗量。为便于研究致密层对导水能力的影响,减少不可控因素,常采用饱和土柱进行浑水入渗试验^[15]。浑水入渗模型的建立也多基于非饱和或完

全饱和入渗试验开展^[16]。需要注意的是,季节性河床入渗—堵塞过程常伴随着饱和与非饱和渗流状态的交替,河床质存在空间变异性。目前,缺乏对不同河床质的浑水入渗—堵塞规律的探究,相关渗流转化机理尚缺少定量分析,与河床物理堵塞相关的入渗模型仍有欠缺。因此,本研究进行饱和土柱浑水入渗试验,在试验过程中监测并分析土柱入渗速率和渗透系数指标以表征河床堵塞特征,剖析堵塞河床饱和—非饱和渗流之间的转化规律,并结合 Darcy 公式与粗粒土渗流公式建立非饱和渗流过程中入渗速率预测模型,为揭示不同河床质入渗—堵塞规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

河床材料:试验装填介质取自永定河北京段山区向平原过渡河床。按中值粒径 D_{50} 从小到大排序,5 种河床质分为 R1-5 型土样,对应中值粒径为 50~600 μm (表 1),河床质粒径采用 Mastersizers-2000 型激光粒度分析仪(英国马尔文仪器公司,测量范围为 0.02~2 000 μm)测定。

浑水配置:入渗试验中浑水悬浮泥沙使用永定河河岸表层土壤配置,其中值粒径为 20 μm 。悬浮液浓度设置为 6 g/L,使用 HG/T 3796.3—2006 桨式搅拌机使其分布均匀。

土柱模拟系统:采用高度 100 cm、内径 10 cm 的透明亚克力圆柱体装填不同介质河床质。玻璃柱底部装填 10 cm 的石英砂作为反滤层。河床基质填充高度为 60 cm,初始下渗水头设置为 10 cm,且通过蠕动泵和溢流装置来保持水头恒定。在离基质表面 5、25、45 cm 深度处安装测压管连续监测水头变化。土柱模拟示意图图 1。

表 1 试验材料的粒度分布特性

Table 1 Particle size distribution characteristics of experimental sediments

材料	序号	颗粒组成			不均匀系数	中值粒径	干密度
		<0.002 mm	0.002~0.05 mm	0.05~2 mm			
土壤	R1	5.25	59.09	35.66	11	50	1.51
	R2	2.89	20.83	76.28	11	100	1.51
	R3	1.00	10.85	88.15	3	150	1.51
	R4	1.38	17.64	80.98	18	300	1.51
	R5	1.41	15.76	82.83	20	600	1.51
浑水颗粒	S	9.82	73.32	16.86	8	20	—

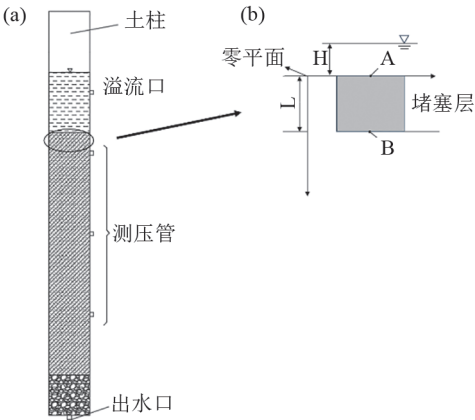


图 1 试验装置与堵塞层水势分析

Fig. 1 Experimental setup and analysis of water potential in clogging layer

1.2 试验流程

试验于 2023 年 8 月在北京师范大学房山综合实验基地进行。试验前准备:1)在测压管一侧及玻璃柱底侧安装球阀,可保证水流自由流出底部。2)试验土柱首先装填过 2 mm 筛网的石英砂,装填深度为 10 cm,并采用木槌砸实。接着分 5 cm 为 1 层分层装填河床质,根据永定河床实际设置装填的介质密体积质量为 1.51 g/cm³,装填总深度为 60 cm。为减少装填介质中微生物对入渗的影响,试验装填的河床质和石英砂均进行高温处理。试验刚开始为清水下渗,入渗约 12 h 土柱达到饱和状态后开始浑水入渗。试验开始后,当出水口有水流后开始测量下渗速率,前 5 次测得的下渗速率取平均值作为初始下渗速率(f_0)。当水位下降 5 cm 高度时观测并记录表面水位和 3 个测压管数值,计算出不同时间的入渗速率和导水率。

根据土柱内的水位变化,计算单位时间内单位面积下渗量(V);单位时间内单位面积土面下渗的水量,即下渗率(f ,mm/min)。

$$f=\frac{Q}{A}=\frac{V}{tA}$$
 (1)

式中: V 为 t 时间内下降的下渗水体积,cm³; A 为垂直于土壤表面的玻璃柱面积,cm²。

根据 Darcy 定律,流量与水力梯度呈正比,即:

$$q=KiA$$
 (2)

式中: q 为渗透流量,cm³/min; i 为水力梯度; A 为土样的横截面积,cm²。

1.3 粗粒土渗流公式推导

当浑水入渗开始后,土柱上界面逐渐发生变化:部分含沙颗粒运移到土壤孔隙中,慢慢滞留在土层内;当大部分孔隙被填充后,浑水中的细泥沙颗粒沉积在土壤表面形成落淤层,随着入渗的进行落淤层逐渐加厚,延长水分在土体中的路径,改变土壤的导水性能,且落淤层渗透系数远小于下方土柱渗透系数,则含沙水填充淤积过程是一个变渗透系数非稳渗流过程。假定土柱顶部发生淤积后,淤积层渗透系数为 k_0 ,淤积过程土柱淤积层整体渗透系数为 $K(t)$, t 时刻土柱顶部淤积层厚度为 $L(t)$,此时土层渗透系数为^[17]:

$$K(t)=\frac{L(t)+L_0}{\frac{L(t)}{k_0}+\frac{L_0}{k'(t)}}$$
 (3)

式中: L_0 为土柱发生堵塞的土壤层厚度,cm; $L(t)$ 表达式为

$$L(t)=\beta\alpha Q(t)$$
 (4)

式中: β 为淤积层厚度修正系数,取值 0~1; α 为浑水的体积含沙量,g/cm³; $Q(t)$ 为 t 时刻的累计入渗量。

土柱顶部淤积层封堵前,浑水中土壤颗粒不断进入土壤,随着细颗粒在土壤孔隙的沉积淤堵,土柱段(不含淤积层)渗透系数 $k'(t)$ 为:

$$k'(t)=Cd^2(t)\frac{\gamma}{u}$$
 (5)

或

$$k'(t)=Cd^2(t)\frac{\gamma}{u}n(t)$$
 (6)

式中: C 为常数,圆管可取 0.5, d 为填充过程中土柱颗粒平均直径,cm; u 为水的黏滞性,Pa/s; γ 为水的容重,N/cm³; R 为水力半径,cm;对于半径为 R_0 的圆

管, $R=0.5R_0$; $n(t)$ 为体积孔隙率。

当土体表面发生淤积后,对堵塞层 A、B 点进行水势计算见图 1b。

土壤表层水势(A点): $\varphi_A = H + 0$ (7)

堵塞层下方水势(B点): $\varphi_B = -L + P$ (8)

则水势差 $\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A = -L - H + P$ (9)

式中: L 为堵塞层厚度, cm; H 为土壤表面水头高度, cm; P 为测压管中相对于 B 点的高度, cm。

由达西定律知,通过土壤的入渗率为:

$$i = -K_s \frac{\varphi_B - \varphi_A}{L} = K_s \frac{L + H - P}{L} = K_s \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$$
 (10)

式中: i 为土壤入渗速率, cm/min; K_s 为堵塞层实测导水率, cm/min; ΔP 为 A 点到 B 点损失的水头, cm。

河床堵塞层转为非饱和状态后,已无法通过测压管读数计算渗透系数。假设河床转为非饱和流后,水头损失达到最大 $H + L$,即为土壤表面水位与测压管安装位置高度差,渗流总路径为随累积入渗量变化的函数 $L + L(t)$,则公式(7)变形为:

$$i = K_s \left(\frac{L + H}{L + L(t)} \right)$$
 (11)

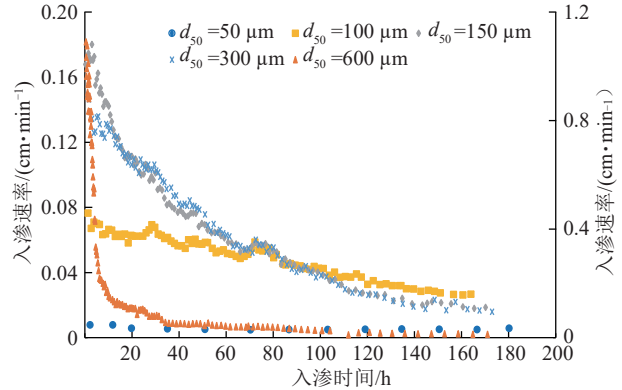
1.4 模型评价标准

模型模拟结果采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来衡量模拟值与实际值之间的均方根差异, RMSE 值越小,表示模拟值精度越高;采用平均绝对相对误差 (mean absolute relative error, MARE) 评价模型模拟效果, MARE 值越接近于 0,说明模型计算精度越高,模拟值越接近于实测值。

2 结果与分析

2.1 浑水入渗过程分析

由图 2 可知,随着入渗的进行,5 种河床质入渗率均呈下降趋势。R1 的入渗速率在 20 h 降幅约为 30%; R2 的入渗速率则呈持续衰减的趋势, 0~50 h 内较初始入渗率下降 25%; R3 的入渗速率也呈持续衰减的趋势, 0~30 h 内降幅约为 34%, 30~50 h 时间段入渗率下降幅度变缓,较初始入渗率下降约 24%; R4 的入渗速率在 0~50 h 内呈快速下降趋势,较初始入渗率下降 58%; R5 的入渗速率在 0~20 h 内急剧下降,降幅达到 89%,后续时段内入渗率缓慢下降至稳定。整体来看,5 种粒径河床的入渗速率分别下降 36%、57%、89%、88%、99%,最终入渗率分别稳定在 0.005、0.026、0.018、0.016、0.013 cm/min。其中 R2 河床入渗速率随时间变化缓慢,是因为 R2 河床质粒径与悬浮泥沙相似,初始入渗率较低,所以相对于粗粒径(R3~R5)河床入渗率变化较为缓慢。



注:左侧坐标轴表示中值粒径为 50~300 μm 河床的入渗速率,右侧坐标轴为中值粒径 600 μm 河床的入渗速率。

图 2 不同河床水分入渗速率

Fig. 2 Infiltration rates of water in different riverbeds

单因素方差分析表明, R1~R5 河床质初始入渗率存在显著性差异(表 2);平均入渗速率总体上随河床质粒径的增大而减小;稳定入渗率表现为 R2>R3>R4>R5>R1,其中除最细河床质(R1)以外,稳定入渗率随河床质粒径的增大而减小,可能是因为悬浮细颗粒更易填补粗质地河床孔隙,从而形成致密黏结层。然而 R1 河床质黏粒高,入渗过程中受悬浮细颗粒堵塞影响小,入渗率始终处于 0.005~0.007 cm/min 变化。

表 2 不同河床入渗参数差异性分析

Table 2 Comparative analysis of infiltration parameters in different riverbeds

河床材料	cm/min		
	f_0	f_a	f_e
R1	0.008a	0.005a	0.006a
R2	0.068b	0.050a	0.027d
R3	0.173d	0.071a	0.026cd
R4	0.129c	0.068a	0.019bc
R5	0.978e	0.141a	0.014b

注:同列不同字母表示不同河床材料间差异显著 ($p < 0.05$); f_0 为入渗开始后 0~1 h 测得的入渗速率的平均值; f_a 为平均入渗速率; f_e 为稳定入渗速率。

2.2 不同河床质堵塞特征

各河床质不同层位归一化渗透系数 (K_T/K_0) 呈不同变化特征(图 3)。崔瑞娟等^[18]的研究表明,归一化渗透系数 K_T/K_0 达到 0.9 时发生轻微堵塞, K_T/K_0 达到 0.5 时发生中等程度的堵塞, K_T/K_0 达到 0.2 时发生严重堵塞。由图 3 可知, R1 河床各层位均未发生堵塞现象。R2~R4 河床堵塞主要发生在 0~5 cm 深度,堵塞后的渗透系数较初始值分别下降约 86%、68%、93%、94%,可判断出 R2、R4 和 R5 河床在该层位发生严重堵塞, R3 河床发生轻微偏中等程度的堵塞。R1 河床 0~45 cm 和 R2~R4 河床 5 cm 以下层位 K_T/K_0 均出现 >1 的情况,可能是由于在渗流作用下土体结构被破坏,形成更多水流路径。

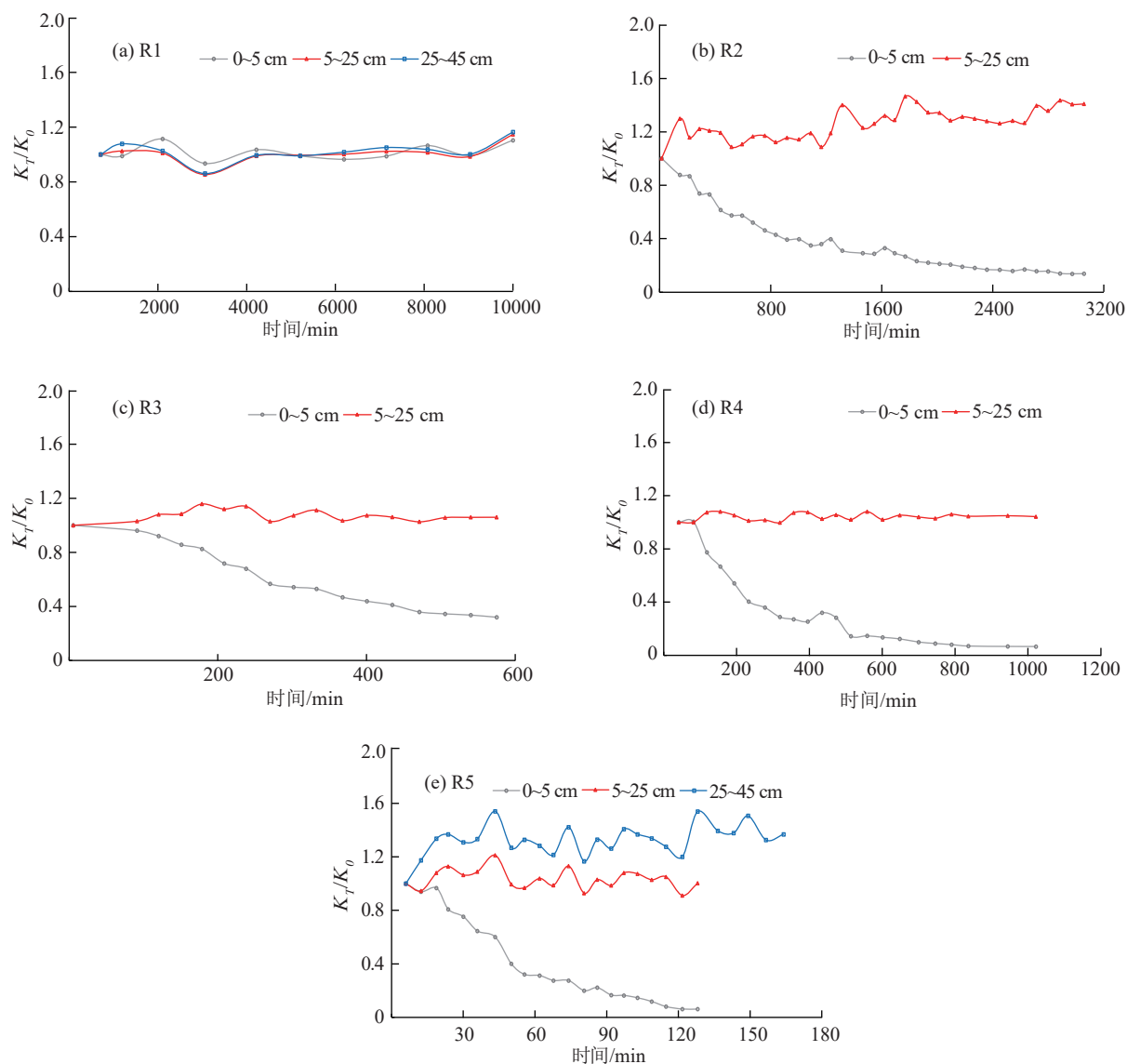


图 3 河床不同深度堵塞特征

Fig. 3 Clogging characteristics at different depths of riverbed

由表 3 可知,R2、R3、R4、R5 河床分别在入渗开始后第 150、140、130、20 min 时发生轻微堵塞 ($K_T/K_0=0.9$),R2、R3、R4、R5 河床分别在入渗开始后第 700、350、378、45 min 时发生中等程度堵塞 ($K_T/K_0=0.5$),R2、R4、R5 河床分别在入渗开始后第 2160、620、85 min 时发生严重堵塞 ($K_T/K_0=0.2$)。

不同粒径河床达到不同程度堵塞的时间不同,R2、R4、R5 河床达到轻微堵塞和严重堵塞的时间分别相差 2 010、490、65 min,R5 河床仅在第 85 min 时达到严重堵塞。表明随着河床粒径的增大,堵塞发生越快,堵塞发展越迅速,河床达到严重堵塞的时间越短。

表 3 各河床不同程度堵塞特征

Table 3 Clogging characteristics of riverbeds at different degrees of clogging

河床材料	堵塞深度/cm	T/min		
		$K_T/K_0=0.9$	$K_T/K_0=0.5$	$K_T/K_0=0.2$
R1	—	—	—	—
R2	0~5	150	700	2160
R3	0~5	140	350	—
R4	0~5	130	378	620
R5	0~5	20	45	85

注: K_0 为初始渗透系数, cm/min。

2.3 河床渗流方式转化过程

图 4 为浑水入渗下堵塞层(0~5 cm 土层)渗透系数和入渗速率的变化过程。渗透系数的消失表明此时测压管无读数,意味着入渗在堵塞作用下由饱和状态转为非饱和状态。R2~R5 河床质发生这一转变的时间表现为 R5(2.6 h) > R4(9.6 h) > R3(17.6 h) > R2(51.2 h), 其中 R1 始终为饱和状态。表明河床粒径越大,河床渗流方式转变越早。值得

注意的是,河床处于饱和状态时,R2~R5 河床渗透系数较初始值分别下降约 86%、68%、93%、94%,入渗率较初始值分别下降约 23%、15%、23%、28%,渗透系数与入渗速率均呈下降趋势,但渗透系数降幅明显高于入渗速率,表明堵塞对渗透系数的影响更大,是因为河床渗流转化过程中渗透系数下降,但水力梯度持续增加,对入渗速率的下降趋势有所缓解。

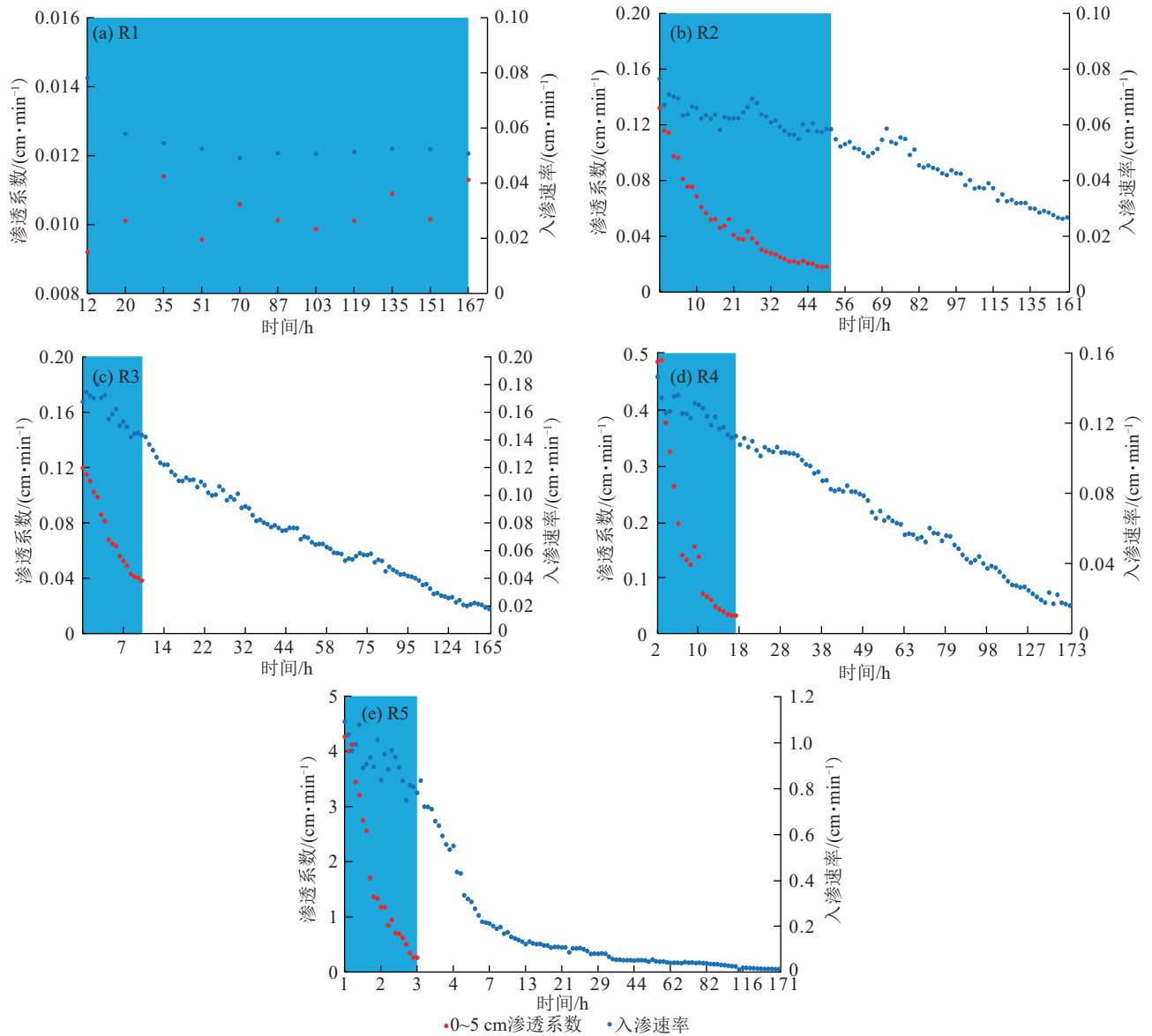


图 4 不同河床饱和-非饱和渗流转化对比

Fig. 4 Comparison of saturated-to-unsaturated seepage transformation in different riverbeds

2.4 饱和-非饱和河床入渗模型改进

非饱和渗透系数(K_r)采用公式(3)计算。由于在试验中无法实时获取土柱平均粒径(d_t),故无法得到动态渗透系数(k'_t),因此,采用土柱顶部开始淤积时的整体渗透系数来计算。根据公式(3)和公式(11)计算出模拟的河床入渗速率,与实测值对比见图 5,具体数值见表 4。图 5 中模型和实测值之间 RMSE 值分别为

0.004 0、0.009 8、0.009 6、0.191 5 cm/min, MARE 值分别为 8.6%、14.7%、22.1% 及 36.6%, R2、R3 和 R4 河床 RMSE 值均 < 0.01 cm/min, R2 和 R3 河床 MARE 值均 < 15%, 所建立的模型能够在一定程度上预测非饱和流情况下河床的入渗速率。中值粒径为 100、150 μm 的河床(R2、R3)的 RMSE 和 MARE 值均小于 300、600 μm 河床(R3、R4), 模型模拟效果更好。

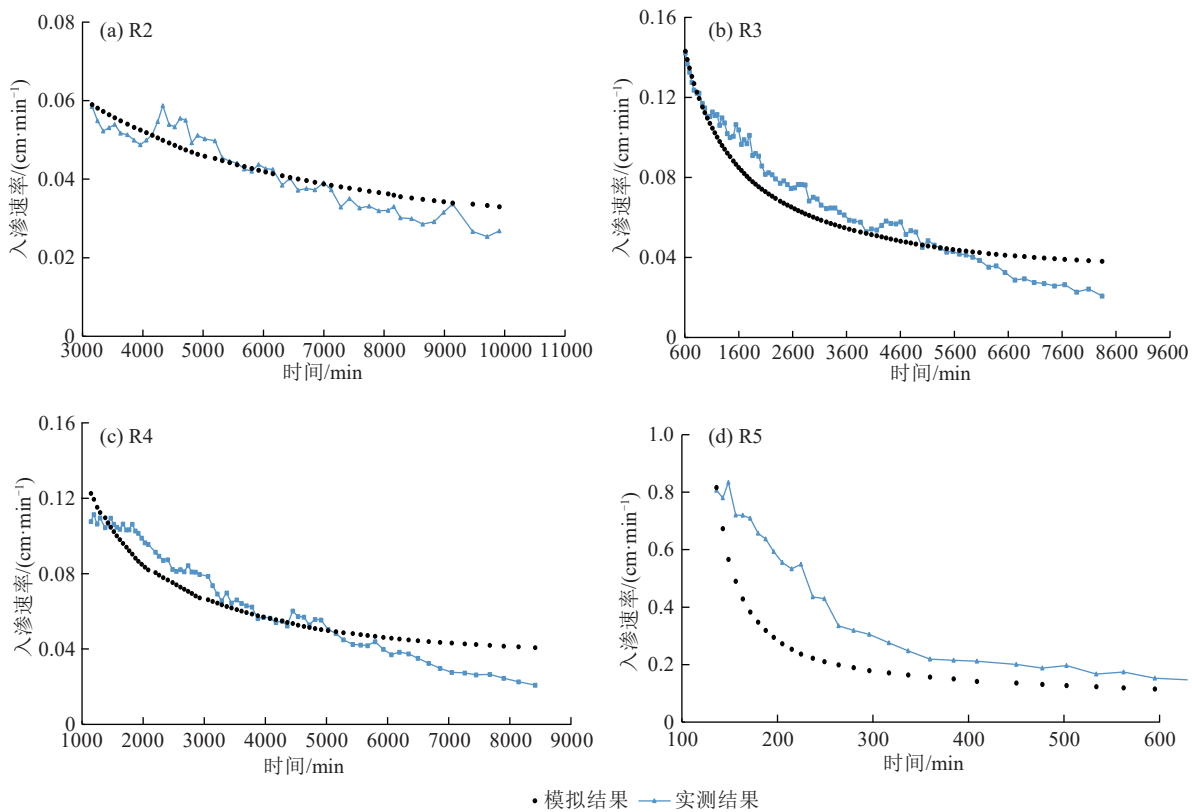


图 5 模型模拟结果与实测结果对比

Fig. 5 Comparison of model simulation results and measured results

表 4 模型精度评价

Table 4 Model accuracy evaluation

河床材料	RMSE	MARE
R2	0.004 0	8.6
R3	0.009 8	14.7
R4	0.009 6	22.1
R5	0.191 5	36.6

3 讨论

浑水入渗下,河床质地越粗,堵塞发生越快,堵塞越严重^[19]。本研究发现,中值粒径为 100~600 μm 河床均只在 0~5 cm 深度发生堵塞,堵塞深度并未随着河床粒径的变化而变化。而耿新新等^[20]采取粗砂、中砂、细砂配置含水介质进行堵塞试验发现,介质堵塞深度随介质中粗砂含量的增多而增大,最终达到 25 cm;单蓓蓓等^[21]在试验中配置的含水介质及悬浮颗粒大小与本研究相似,但 $<100\ \mu\text{m}$ 的颗粒仅占 5% 左右,一定悬浮液浓度下,介质堵塞深度为 35 cm,二者得出的结论均与本研究有所差异。究其原因可能是因为试验土样中存在 10%~20% 的黏粒、粉粒,这些细颗粒大大降低土壤孔隙度^[22],使得细泥沙大多沉积于河床表面发生表面堵塞^[23]。因此,河床质中一定量的黏粒、粉粒可以降低堵塞发生的深度,而主要由砂粒构成的河床质堵塞深度与河床粒径大小呈正比。综上,浑水在不同颗粒粒径组

成的河床质上的堵塞规律还需进一步探究。

浑水下渗过程中,泥沙颗粒进入土壤表层孔隙减弱渗透性,导致渗透系数快速下降^[24]。入渗速率不仅取决于渗透系数,还与水力梯度有关^[25],即土壤表面的水位由于持续补水而保持相对稳定,而土壤下部由于堵塞使得水流受阻,导致上下水头差逐渐增大,从而增大水力梯度,减缓入渗速率的下降。堵塞层深度的确定可能受测压管安装深度影响,本研究实际堵塞层厚度可能 $<5\ \text{cm}$,因此真实水力梯度增幅可能更小,入渗速率实际降幅可能更大。

本研究推导出的河床非饱和流入渗模型适用于中值粒径为 100~300 μm 的河床质,粗质地河床模拟效果并不理想,可能是由于细质地河床土壤更为紧密,内部结构较好,减弱含沙水中的泥沙进入土体内部的可能性^[26-27],淤积层厚度预测更为准确,且渗透系数未发生较大变化,而粗质地河床内部细颗粒运移、堵塞和沉积现象更为明显,渗透系数较初始值有较大变化,因此,使用初始值代替全程渗透系数存在一定偏差。党发宁等^[28]在浑水下渗粗粒土试验中应用该公式也取得类似结论,表明该公式不仅适用于粗粒土渗流,也可应用于浑水下渗河床情景。

4 结论

1) 细质地 ($\leq 50\ \mu\text{m}$) 河床入渗过程中未发生堵塞,较粗质地 (100~600 μm) 河床堵塞主要发生在 0~

5 cm 土层,河床质堵塞程度和堵塞发展速度与粒径呈正比,堵塞发生时间与粒径呈反比。说明河床质地越粗,受细泥沙淤积堵塞影响越大。后期恢复干涸河床流量或回补地下水需考虑堵塞过程。

2) 细质地($\leq 50 \mu\text{m}$)河床渗流方式始终为饱和渗流,较粗质地($100\sim 600 \mu\text{m}$)河床渗流转变时间约在 2.6~51.2 h,转变时间随粒径的增大而减小。质地较粗的河床发生堵塞时更容易转变为脱节河床。

3) 建立基于 Darcy 定律与粗颗粒渗流公式的河床非饱和流入渗过程模型,模型总体对中值粒径为 $100\sim 300 \mu\text{m}$ 河床入渗过程模拟效果较好,相对误差均 $< 37\%$ 。说明该模型可应用在质地适中的河床质上。

参考文献:

- [1] MESSAGER M L, LEHNER B, COCKBURN C, et al. Global prevalence of non-perennial rivers and streams[J]. *Nature*, 2021, 594(7863): 391-397.
- [2] 李晓琳, 潘兴瑶, 杨默远, 等. 基于生态补水的永定河流域径流变化分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(6): 886-892.
LI X L, PAN X Y, YANG M Y, et al. Streamflow changes of Yongding River basin after ecological water compensation [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2022, 58(6): 886-892.
- [3] 徐佳琪, 吴悦, 仇文顺, 等. 永定河北京段生态补水量及模式[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(4): 669-678.
XU J Q, WU Y, QIU W S, et al. Ecological water replenishment and discharge mode in Beijing section of the Yongding River [J]. *South to North Water Diversion and Water Conservancy Technology (Chinese and English)*, 2023, 21(4): 669-678.
- [4] 翟远征, 姜亚, 夏雪莲, 等. 永定河生态补水下渗对地下水质量的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(4): 1861-1868.
ZHAI Y Z, JIANG Y, XIA X L, et al. Impact of infiltration of ecology water replenishment of the Yongding River on groundwater quality and the mechanism [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(4): 1861-1868.
- [5] 苟少杰, 仇文顺, 李述, 等. 大规模生态补水对长期断流河道永定河北京段入渗能力的影响[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(8): 35-38.
GOU S J, QIU W S, LI S, et al. Effect of large-scale ecological water replenishment on infiltration capacity of Beijing section of long-term cut-off River Yongding River [J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(8): 35-38.
- [6] 申冠卿, 张原锋, 王平, 等. 小浪底水库降水排沙对其下游河床演变的影响[J]. *水科学进展*, 2024, 35(6): 927-937.
SHEN G Q, ZHANG Y F, WANG P, et al. Impacts of sediment flushing of Xiaolangdi Reservoir on fluvial processes in the Lower Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(6): 927-937.
- [7] DUBUIS R, DE CESARE G. The clogging of riverbeds: A review of the physical processes [J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 239: e104374.
- [8] BAI J, YUAN Z J, SU X S. Evolution of river-aquifer disconnections and the migration and transformation of iron and manganese under non-time-varying/time-varying riverbed permeability [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: e175156.
- [9] DU X Q, YE X Y, ZHANG X W. Clogging of saturated porous media by silt-sized suspended solids under varying physical conditions during managed aquifer recharge [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(14): 2254-2262.
- [10] ZHANG W Q, LV C, ZHAO X, et al. The influence mechanism of the main suspended particles of Yellow River sand on the emitter clogging—An attempt to improve the irrigation water utilization efficiency in Yellow River Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 258: e107202.
- [11] 钟韵, 费良军, 朱士江, 等. 浑水含沙率对一维垂直入渗特性及致密层形成特性的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 602-609.
ZHONG Y, FEI L J, ZHU S J, et al. Effect of sediment concentration of muddy water on one-dimensional vertical infiltration characteristics and dense layer formation characteristics [J]. *Soils*, 2022, 54(3): 602-609.
- [12] 王诏楷, 束龙仓, 刘波, 等. 孔隙结构对地下水回灌颗粒堵塞影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 498-506.
WANG Z K, SHU L C, LIU B, et al. Experimental research on the effects of pore structure on particle clogging of groundwater recharge [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 498-506.
- [13] 毛海涛, 张超, 袁古城, 等. 浑水入渗对粗粒土柱孔隙及渗透性影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(1): 173-183.
MAO H T, ZHANG C, YUAN G C, et al. Experimental study on influences of seepage of muddy water on porosity and permeability of coarse-grained soil columns [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2025, 47(1): 173-183.
- [14] 钟韵, 费良军, 朱士江, 等. 浑水膜孔灌入渗特性与致密层形成特性[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 238-246.
ZHONG Y, FEI L J, ZHU S J, et al. Infiltration characteristics of muddy water film-hole irrigation and formation characteristics of dense layers [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 238-246.
- [15] 康守旋, 费良军, 钟韵, 等. 多因素作用下浑水入渗对土壤导水特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(9): 83-90.
KANG S X, FEI L J, ZHONG Y, et al. Effects of muddy water infiltration on the hydraulic conductivity of soils by multiple factors [J]. *Transactions of the Chinese*

- Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(9):83-90.
- [16] 毛海涛, 张超, 何涛, 等. 浑水渗流对粗粒土渗透特性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9):140-150.
- MAO H T, ZHANG C, HE T, et al. Influences of seepage of muddy water on the permeability of coarse-grained soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9):140-150.
- [17] SAAVEDRA C E, TEITELBAUM Y, ARNON S, et al. Turbulence-driven clogging of hyporheic zones by fine particle filtration[J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(20):e2023GL105002.
- [18] 崔瑞娟, 杜新强, 冶雪艳. 地下水人工回灌水化学因素对生物堵塞的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10):4658-4667.
- CUI R J, DU X Q, YE X Y. Effect of hydrochemical factors on bio-clogging during artificial recharge of groundwater[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10):4658-4667.
- [19] 白丹, 李占斌, 洪小康, 等. 浑水入渗规律试验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1):59-62.
- BAI D, LI Z B, HONG X K, et al. Experimental research on infiltration capability of muddy water[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(1):59-62.
- [20] 耿新新, 马琳娜, 朱谱成, 等. 基于人工回灌场地典型含水介质的悬浮物堵塞实验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28):29-35.
- GENG X X, MA L N, ZHU P C, et al. Experimental study on clogging of suspended matter based on typical aquifer medium in artificial reinjection site[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(28):29-35.
- [21] 单蓓蓓, 郑西来, 乔振基, 等. 人工回灌过程中含水介质物理堵塞的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(10):97-101.
- SHAN B B, ZHENG X L, QIAO Z J, et al. Experimental study of aquifer physical clogging during artificial recharge process[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(10):97-101.
- [22] 唐凯, 郭丹, 沈才华, 等. 细颗粒含量对极细砂渗透性的影响规律和微观机理[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6):46-51.
- TANG K, GUO D, SHEN C H, et al. Influence rule of fine particle content on sand permeability and its mesoscopic mechanism[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6):46-51.
- [23] GUTIÉRREZ J P, VAN HALEM D, UIJTTEWAAL W S J, et al. Natural recovery of infiltration capacity in simulated bank filtration of highly turbid waters[J]. Water Research, 2018, 147:299-310.
- [24] STUYFZAND P J, JUHÁSZ-HOLTERMAN M H A, DE LANGE W J. Riverbank filtration in the Netherlands: Well fields, clogging and geochemical reactions [C]// Riverbank Filtration Hydrology. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006:119-153.
- [25] 宋林辉, 黄强, 闫迪, 等. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(9):1635-1641.
- SONG L H, HUANG Q, YAN D, et al. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9):1635-1641.
- [26] 姚弘毅, 李九发, 戴志军, 等. 长江河口北港河道泥沙特性及河床沙再悬浮研究[J]. 泥沙研究, 2013, 38(3):6-13.
- YAO H Y, LI J F, DAI Z J, et al. Sediment character and bed load resuspension in North Channel of Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2013, 38(3):6-13.
- [27] 魏家兴, 费良军, 梁爽, 等. 泥沙颗粒级配组成对浑水波涌灌间歇入渗特性的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(10):57-62.
- WEI J X, FEI L J, LIANG S, et al. Influence of sediment particle size distribution on intermittent infiltration of water under surge irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(10):57-62.
- [28] 党发宁, 刘云贺, 陈军强, 等. 浑水渗流理论及其工程应用[J]. 中国科学E辑:技术科学, 2006, 36(9):1029-1036.
- DANG F N, LIU Y H, CHEN J Q, et al. Muddy water seepage theory and its engineering application[J]. Science in China, Series E (Information Sciences), 2006, 36(9):1029-1036.