

东北黑土区切沟沟头储水量对降雨的响应

王文起, 马超

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 为探究东北黑土区切沟沟头储水量对降雨的响应特征, 揭示降雨前后沟头储水量的变化规律, 建立降雨前后储水量变化的定量预测方法。[方法] 以九三、宾县和九台 3 个研究区发育阶段及规模相近的 4 个切沟沟头为研究对象, 通过瞬态脱湿-吸湿试验、数值拟合和储水量预测模型构建, 深入探究不同切沟土壤水力学参数差异、储水量衰减系数差异和储水量在降雨前后的变化规律。[结果] 沟头土壤土水特征曲线存在明显滞后效应, 滞后效应强弱排序为沟 1 $\approx$ 沟 2 $<$ 沟 3 $<$ 沟 4。降雨后储水量随时间呈指数衰减, 初期消退快、后期变缓。储水量衰减系数(K_d)随土层深度依次减小。模型模拟表明, 85.7% 的点位储水量变化与以最大 1 h 雨强为降雨输入参数的预测结果最吻合, 14.3% 的点位以最大连续 2 h 平均雨强输入更优。因此, 在开展土壤储水量预测时, 入渗性能好的点位可选取 I_{1h} 为降雨输入参数, 如沟头或受侵蚀严重的点位; 而入渗性能差或有强烈水分再分配点位应选取 I_{2h} 为降雨输入参数。[结论] 东北黑土区切沟沟头降雨后储水量演化可通过指数衰减规律及短历时降雨指标加以有效表征, 所构建模型可较准确地实现事件尺度下沟头短期储水量变化的定量预测, 为沟蚀过程预测预警提供方法支撑。

关键词: 东北黑土; 切沟; 储水量; 衰减系数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0152-11

Responses of Water Storage of Gully Heads to Rainfall in Black Soil Region of Northeast China

Wang Wenqi, Ma Chao

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the response characteristics of water storage at gully heads to rainfall in the black soil region of Northeast China, reveals the variation patterns of water storage at gully heads before and after rainfall, and establishes a quantitative prediction method for its changes before and after rainfall. [Methods] Four gully heads with similar developmental stages and scales in three study areas (Jiusan, Binxian and Jiutai) were selected as research objects. Differences in soil hydraulic parameters, decay coefficients of water storage, and variation patterns of water storage before and after rainfall were investigated through transient water release and imbibition method (TRIM), numerical fitting, and prediction model construction. [Results] Obvious hysteresis effects were observed in soil-water characteristic curves (SWCC) of soils at gully heads, with the intensity ranking as gully 1 $\approx$ gully 2 $<$ gully 3 $<$ gully 4. After rainfall, water storage decayed exponentially over time, showing rapid decline in the initial stage and slower decline in the later stage. The decay coefficient (K_d) of water storage decreased progressively with increasing soil depth. Model simulations showed that water storage changes at 85.7 % of the monitoring sites were best predicted using 1 h maximum rainfall intensity (I_{1h}) as the rainfall input parameter, whereas 14.3 % of the sites were better simulated using 2 h average maximum continuous rainfall intensity (I_{2h}) as input. Therefore, in predicting soil water storage changes, I_{1h} could be

收稿日期: 2025-12-27

修回日期: 2026-02-23

录用日期: 2026-04-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-05-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1501201-3)

第一作者: 王文起(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: m17832087224@163.com

通信作者: 马超(1986—), 男, 博士, 教授, 主要从事山地灾害成灾动力研究。E-mail: sanguoxumei@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

selected as the rainfall input parameter for sites with good infiltration performance, such as gully heads or severely eroded sites. However, I_{2h} should be selected as the rainfall input parameter for sites with poor infiltration performance or strong water redistribution. [Conclusion] The evolution of water storage at gully heads after rainfall in the black soil region of Northeast China can be effectively characterized using exponential decay patterns and short-duration rainfall indices. The constructed model can accurately and quantitatively predict short-duration water storage changes at gully heads at the event scale, which provides methodological support for prediction and early warning of gully erosion processes.

Keywords: black soil region in Northeast China; gully; water storage; decay coefficient

Received: 2025-12-27

Revised: 2026-02-23

Accepted: 2026-04-01

Online(www.cnki.net): 2026-05-21

东北黑土区是我国最重要的商品粮生产基地,被誉为中国粮食的“压舱石”^[1]。然而,近年来,东北黑土区的水土流失日益严重,水土流失面积占区域总面积的18.95%^[2]。其中沟蚀的危害尤为突出,其危害性强、潜在威胁性大、治理紧迫性高的特征,严重威胁东北黑土区的粮食安全,阻碍现代农业的发展^[3]。

沟蚀是东北黑土区农田土壤流失的主要形式之一,其发生和发展受降雨特征和土壤水分状况的共同制约^[4-6]。沟蚀的形成通常需要达到一定的降雨阈值并具备汇流条件,即当降雨强度和历时超过土壤入渗能力时,汇集的地表径流便会冲刷出侵蚀沟^[7]。在此过程中,前期土壤含水量与降雨入渗共同影响产流阈值与径流强度,进而使沟蚀降雨阈值随地形、土壤性质及土壤水分状况而变化^[8]。沟头常出现在坡度较陡、汇水面积大的部位^[9],作为汇流集中与沟道演化的重要部分,其水分状态与稳定性直接影响沟道延伸与扩张。侵蚀沟形成后,沟头持续向上游侵蚀使沟长延伸,沟底下切加深、沟壁坍塌拓宽使沟道进一步扩大^[10]。杨丽娟等^[11]、黄萌等^[12]研究表明,降雨条件对沟蚀影响极大。年降雨量偏高时沟蚀明显加剧,多雨年沟蚀体积增量可较常年高出数倍,极端湿润年的侵蚀量甚至占10 a总量的1/2以上^[13]。强降雨事件可促使浅沟在雨季内快速发育,单次强降雨过程造成的土壤流失可占总侵蚀量的29%~45%^[14]。不同降雨指标对不同部位沟蚀过程的影响有所差异:谷底沟的侵蚀与最大降雨量关系最为密切,而坡面沟侵蚀则与降雪量、产流降雨侵蚀力、最大降雨量的复合指标相关性更显著^[15]。Ma等^[16]研究表明,在沟底下切、沟壁拓宽的过程中,土体储水量是连接降雨入渗、产流与力学响应的关键控制量。储水量较低时,可削弱地表产流,但雨后高含水状态与孔隙水压力升高降低土体抗剪强度,易诱发沟壁坍塌从而促进沟道加宽;当储水量接近饱和时,超渗产流增强,沟底水力剪切力随之升高,从而加剧沟底

冲刷下切及沟头溯源退缩。目前,针对东北黑土区切沟沟头关键侵蚀源区,沟头土体储水量对短历时降雨的动态响应及雨后衰减规律仍缺乏可参数化的系统认识,限制沟蚀过程的定量预测与预警。

为探究东北黑土区切沟沟头储水量对降雨的响应特征,揭示降雨前后沟头储水量的变化规律,本研究在3处典型黑土小流域内选取4个切沟沟头作为研究对象。布设仪器进行连续监测获取气象水文数据。开展瞬态脱湿-吸湿试验获取水力学参数,计算土壤储水量。使用指数衰减模型,拟合不同深度条件下储水量的衰减系数。最后,构建出基于短历时降雨指标的日尺度储水量预测模型,以期对切沟土壤侵蚀预测预报提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省嫩江市鹤山农场鹤北流域、黑龙江省哈尔滨市宾县郭万有屯小流域和吉林省长春市九台区梁家沟小流域(图1)。鹤北流域(48°59'34"~49°02'36"N, 125°15'46"~125°20'47"E)地形为漫岗丘陵,坡度为1°~6°。属大陆性季风气候,多年平均降雨量为463 mm,多年平均气温为0℃。郭万有屯小流域(45°52'12"~45°58'10"N, 127°33'30"~127°38'21"E)为漫岗丘陵地形,地势平缓,坡度为1°~7°。属寒温带大陆季风气候,年平均降雨量为550 mm,年平均气温为3.9℃。梁家沟小流域(44°17'31.35"~44°18'45"N, 126°06'25"~126°06'30"E)地貌类型为丘陵,地形起伏明显。属中温带大陆季风气候,年平均降水量为580~600 mm,年平均气温为4.7~7.8℃。3个小流域土壤均以典型黑土为主,降雨集中在6~8月,占全年降雨的70%~90%。

图2为研究区内选取的典型黑土切沟示意图,4条切沟的发育阶段及规模相近。切沟(a)横穿林带,沟头侧壁土体成分较为一致,记为沟1;切沟(b)位于农田内部,土体成分均一旦结构较为紧实,颜色呈黑褐色,记为沟2;切

沟(c)位于农田内部,周围作物为玉米,切沟一侧靠近林带,颜色呈黑褐色,记为沟3;切沟(d)位于农田内部,周围作物为玉米,靠近主沟,颜色呈黄褐色,记为沟4。

1.2 研究方法

为阐明切沟沟头土壤对降雨过程的入渗蓄水响应,并建立日尺度的储水量预测模型。研究通过获取的数据进行参数拟合,根据所得参数构建模型,最后进行可靠性检验。具体步骤为:首先在3处典型黑土小流域选择发育阶段与规模相近的4个切沟沟头布设监测仪器,获取降雨与分层含水率连续序列;其次采集沟头土样开展瞬态脱湿-吸湿试验,并以 VG-Mualem 函数为基础借助 Hydrus-1D 反演水力学参数;随后计算储水量,通过指数模型反演储水量衰减系数 K_d ,在此基础上,基于漏桶模型构建日尺度储水量预测模型,其中降雨输入参数(I_{th})采用最大 1 h 雨

强及最大连续 2~4 h 平均雨强以表征短历时降雨过程的峰值特征;最后,利用独立实测含水率数据对模型进行验证,通过统计学指标评价模型精度。

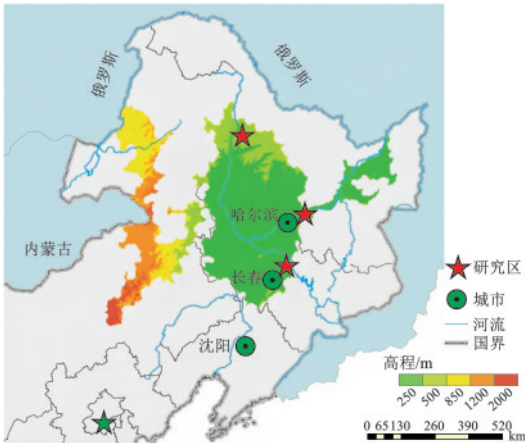


图 1 研究区概况
Fig.1 Overview of study areas

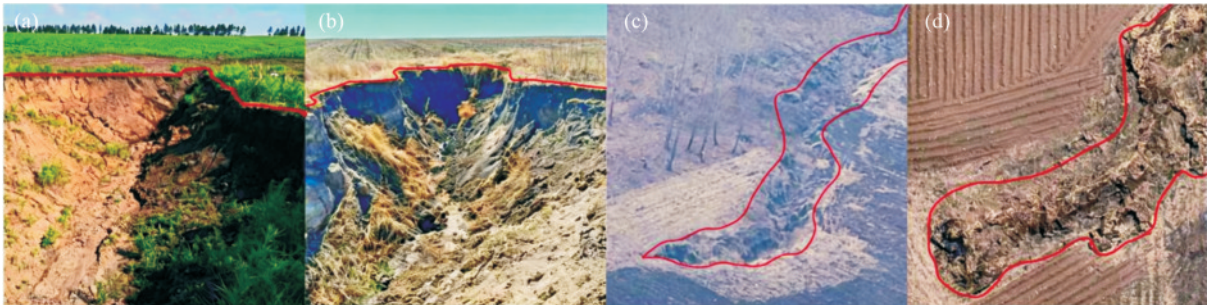


图 2 监测切沟布设
Fig.2 Layout of monitored gullies

1.2.1 数据获取 所用数据分为观测数据和实测数据。从表 1 可以看出,观测数据包括土壤含水率及雨量数据。土壤含水率测定通过智能含水率传感器获取,传感器安装在切沟沟头 1.5 m 处,可测定 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层体积含水率,数据采集时间间隔为 2 h。雨量数据通过压电式雨量计获取,雨量计安装在沟域范围内居民家中,数据采集时间间隔为 1 h。

表 1 监测切沟数据类型及采集时间				
Table 1 Data types and collection times of monitored gullies				
数据类型	具体指标	监测切沟	年份	数据采集时间(月-日)
观测数据	含水率及雨量	沟 1	2022	07-14—09-30
		沟 3	2025	07-29—09-30
		沟 4	2025	07-15—09-30
实测数据(验证)	含水率	沟 2	2024	07-29,08-03,08-06,08-11,08-18
		沟 3	2025	07-16,07-27,07-30,08-03
		沟 4	2025	07-08,07-11,07-21,07-28

实测数据分为实测土壤含水率数据及土壤样品。实测土壤含水率数据获取方式为雨后使用手持

式土壤温度湿度检测仪在切沟沟头附近的沟壁处测量,测量深度为 20 cm,平行采集 3 次取平均值作为该处实测值,其中沟 2 选定 6 个实测点,沟 3 和沟 4 均选定 4 个实测点,数据采集时间见表 1。使用环刀采集土壤样品以测定土壤水力学参数。于沟头处距表层 0~40 cm 的沟壁位置,铲除外层扰动土,打入高(H) 25.4 mm、直径(D) 61.8 mm 的环刀取样,平行采集 3~4 个样品为 1 组。

基于沟 1、沟 3、沟 4 的观测数据,首先通过瞬态脱湿-吸湿试验获取各沟头水力学参数,随后通过计算得到储水量序列,拟合得到储水量衰减系数(K_d)。为检验储水量预测模型的准确性,采用实测数据作为独立验证数据开展对比验证。由于沟 1 缺乏实测数据,本文选取实测数据完整的沟 2 作为对照验证点参与验证。基于表 2 的数据对比,沟 1 与沟 2 土壤体积分质量分别为 1.62/1.55 g/cm³,颗粒级配均以黏粒为主(65.95%、70.52%),砂粒含量接近(21.31%、23.68%),表明两沟土体组成相近。最终选取沟 2、沟 3、沟 4 的实测数据对模型预测的储水量进行精度评估,从而保证模型可靠性。

表2 土壤基础物理性质对比

Table 2 Comparison of basic physical properties of soils

监测 切沟	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	孔隙 度/%	级配		
			黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
沟1	1.62	30.82	65.95	12.74	21.31
沟2	1.55	44.14	70.52	5.80	23.68

1.2.2 数据处理 土壤水力学参数测定:采用瞬态脱湿吸湿试验装置(transient water release and imbibition method, TRIM)对4条切沟的土壤样品进行测定以获取关键水力学参数;随后以 Van Genuchten 土水特征函数^[17]与 Mualem 导水率函数^[18]为理论基础,借助 Hydrus-1D 对脱湿与吸湿阶段观测数据开展反演分析,相关计算公式为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} \quad (1)$$

$$K = K_s \frac{\left\{ 1 - (\alpha|h|)^{n-1} \left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{n-1}} \right\}}{\left[1 + (\alpha|h|)^n \right]^{\frac{1}{2} - \frac{1}{2n}}} \quad (2)$$

式中: θ 为实测含水率; θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率; α 为进气值的倒数,/ kPa ; h 为基质吸力(或压力水头); n 为孔径分布相关的形状参数; K 为非饱和渗透系数, cm/s ; K_s 为饱和渗透系数, cm/s 。

雨量数据处理:降雨强度是控制土壤水分入渗补给与产流过程的重要因子^[19]。为在日尺度储水量预测中保留降雨过程的日内峰值信息,以当日 08:00 至次日 08:00 为当日降雨数据,在 1 次降雨过程中,把降雨量按连续 i h 为单位划分,计算每个 i h 内的平均雨强。其中最大数值为最大连续 i h 平均雨强。计算最大 1 h 雨强、最大连续 2 h 平均雨强、最大连续 3 h 平均雨强和最大连续 4 h 平均雨强,并记为 I_{1h} 、 I_{2h} 、 I_{3h} 和 I_{4h} ,作为降雨输入参数。

观测含水率数据处理:为将观测含水率转换为日尺度代表值,使其反映当日主导过程。当日有降雨时,土壤含水率受入渗补给影响呈上升趋势并在降雨后达到峰值,故取当日含水率最大值记为当日含水率数据,以表征降雨引起的最大增湿效应;当日无降雨时,土壤含水率受蒸散与重力排水控制呈衰减趋势,故取当日含水率最小值记为当日含水率数据,以表征当日衰减后的低值状态。

土壤储水量可通过土层深度及有效饱和度来评估,计算公式为:

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \times h \quad (3)$$

式中: S 为土壤储水量, mm ; θ 为实测体积含水率; θ_r 为残余含水率; θ_s 为脱湿条件下的饱和含水率; h 为土层深度,取 200 mm。

1.2.3 参数拟合 为表征降雨后储水量的消退特征,本文采用指数衰减模型对 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层的储水量衰减系数进行反演。计算公式为:

$$S_t = S_0 \times e^{-K_d t} \quad (4)$$

式中: S_0 为消退段起始时刻的储水量, mm ; K_d 为储水量衰减系数,/ d ; t 为相对天数。

基于沟 1、沟 3 和沟 4 的观测含水率数据,计算不同深度储水量。以 0~20 cm 作为参考层,识别降雨后储水量连续下降的时段作为消退段。为确保不同层位的参数具有可比性,各层位均在相同的消退时段内估计 K_d 。参数估计采用遍历搜索方式在预设范围 $K_d \in [0.001, 0.999]$ 内寻找使总体拟合偏差最小的 K_d ,从而获得该层位在多个消退过程下的统一衰减特征。拟合优度以决定系数 R^2 进行评价,用于衡量指数消退模型对观测消退过程的解释能力。最终得到沟 1、沟 3 和沟 4 在 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 深度的储水量衰减系数。

1.2.4 模型构建 为描述储水量在给定时段内的变化规律,基于漏桶模型^[20-21],构建日尺度的储水量预测模型:

$$S_t = S_0 \times e^{-K_d t} + \frac{I_{th}}{K_d} (1 - e^{-K_d t}) \quad (5)$$

式中: S_t 为 t 时刻的储水量, mm ; S_0 为起始时刻的储水量, mm ; K_d 为储水量衰减系数,用于表征储水量衰减的快慢, K_d 越大,储水量消退越快,/ d ; I_{th} 为该时段内的降雨输入参数,用于表征降雨引起的水分补给, mm/d 。

从结构上看,该模型可分解为消退项和输入项 2 部分,前者随时间按指数规律衰减,后者因降雨输入而累积。

1.2.5 模型检验 用距离表层 20 cm 处采集到的实测含水率数据进行模型精度检验。首先,将实测含水率数据代入公式(3)得到起始时刻储水量 S_0 ,其次将 S_0 、0~40 cm 的储水量衰减系数 K_d 及不同降雨输入参数 I_{th} 同时代入公式(5),然后用平均绝对误差判断最优的水分补给强度参数。最后用最优水分补给强度得出储水量预测值与实测值进行 1:1 检验,并用统计指标来判断模型可靠性。

均方根误差(root mean square error, RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (6)$$

平均绝对误差(mean absolute error,MAE):

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\left|\hat{y}_i-y_i\right|$$

(7)

平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error,MAPE):

$$MAPE=\frac{100\%}{n}\sum_{i=1}^n\left|\frac{\hat{y}_i-y_i}{y_i}\right|$$

(8)

式中: y_i 为第*i*个样本的实测值; $\hat{y}_i$ 为其对应的预测值;
*n*为样本数量。

2 结果与分析

2.1 土水特征曲线

表 3 为基于 Hydrus-1D 反演得到的土壤水力学参数。利用参数绘制观测含水量范围内的整个土体的土水特征曲线 (soil-water characteristic curve, SWCC) 及水力传导函数曲线 (hydraulic conductivity function, HCF) (图 3), 从而表达土体在变饱和条件

下的储水-排水过程及导水能力在不同含水率状态下的变化特征。图 3a~图 3d 分别为沟 1、沟 2、沟 3、沟 4 的 SWCC 及 HCF。在 VG-Mualem 模型中, 饱和含水率(θ_s)与残余含水率(θ_r)分别是含水率的上下边界。 θ_s 表征土体接近饱和时的储水上限。当其他参数相近时, θ_s 越大, 土体越能储水。 θ_r 表征在高基质吸力下仍难以排出的束缚水, 是 SWCC 在高基质吸力端的渐近下限。 θ_r 越大, 土体在干燥阶段越能维持含水状态, 反映出更强的持水能力。参数 α 控制曲线在吸力尺度上的位置。当其他参数不变时, α 越小, 在相同含水率下基质吸力越大, 表明持水能力越强。孔径分布参数(*n*)主要调节 SWCC 过渡段的陡缓程度, *n* 越小对应过渡段越平缓, 孔径分布越分散。饱和和渗透性系数(K_s)表示近饱和条件下导水能力的上限, K_s 越大意味着导水通道连通性越好或大孔隙贡献越显著, 从而使饱和与近饱和阶段的水分传输越迅速。

表 3 Hydrus-1D 反演出的土壤水力学参数
Table 3 Soil hydraulic parameters inverted by Hydrus-1D

监测 切沟	残余含水率	饱和含水率		进气值的倒数		孔径分布参数		饱和渗透性系数	
	(θ_r)/%	θ_s^d /%	θ_s^w /%	α^d /kPa ⁻¹	α^w /kPa ⁻¹	<i>n</i> ^d	<i>n</i> ^w	K_s^d /(cm·s ⁻¹)	K_s^w /(cm·s ⁻¹)
沟 1 ^[22]	2.62	57.00	53.00	4.20×10 ⁻³	0.02	1.69	1.95	4.73×10 ⁻⁶	2.64×10 ⁻⁵
沟 2 ^[22]	2.79	57.00	53.00	4.00×10 ⁻³	0.02	1.74	1.98	5.64×10 ⁻⁶	2.75×10 ⁻⁵
沟 3	1.32	51.88	32.29	2.35×10 ⁻³	0.13	1.94	1.91	7.22×10 ⁻⁶	1.68×10 ⁻⁶
沟 4	4.01	59.38	51.53	2.97×10 ⁻³	0.38	1.97	2.10	1.47×10 ⁻⁵	1.89×10 ⁻⁵

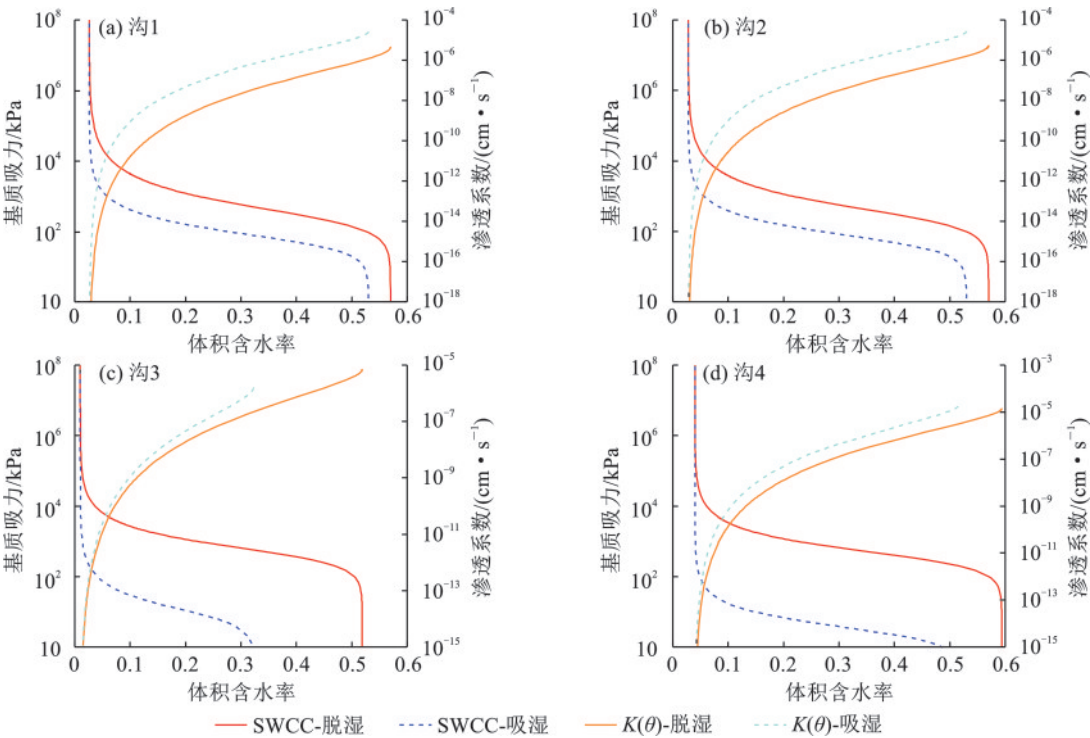


图 3 通过 TRIM 试验获得的土水特征曲线
Fig.3 Soil-water characteristic curves obtained from transient water release and imbibition method (TRIM)
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

进气压力代表空气进入饱和土壤并开始排水的临界值。对比脱湿阶段的进气值可知,沟1与沟2的进气值近似相同,二者均低于沟4进气值,且明显低于沟3进气值。表明沟1与沟2更容易达到启动排水的条件,更容易进入脱饱和排水阶段;而沟3与沟4需在更高基质吸力条件下才开始排水,相对不容易达到启动排水条件。SWCC的滞后效应体现在脱湿与吸湿曲线在相同含水率状态下对应基质吸力的差距^[23]。具体来看,沟1和沟2滞后效应弱于沟3和沟4。沟1沟2进气值在脱湿条件下为238~250 kPa,吸湿约50 kPa,脱湿吸湿间约为4~5倍差异,且饱和含水率在2条路径间仅小幅降低,由57%降至53%;沟3和沟4进气值在脱湿条件下为337~426 kPa,而吸湿进气值降至2.63~7.69 kPa,脱湿与吸湿间相差约55~128倍。已有研究^[24]指出,滞后效应与孔隙结构及颗粒级配相关,当细颗粒含量较高、大孔隙不足时,孔隙水迁移速率降低,脱湿-吸湿过程的路径依赖性更强,从而表现出更强的滞后效应。滞后效应越强,土壤在相同基质吸力下的保水能力越强,表现为雨后含水率与储水量消退过程较缓、衰减系数较小,对降雨事件的响应相对

滞后。从分析结果来看,滞后效应强弱呈现沟1≈沟2<沟3<沟4的总体趋势。与SWCC的滞后效应相同,HCF显示非饱和渗透系数随含水率升高快速增大,在相同含水率下吸湿路径总体高于脱湿路径。

2.2 含水率衰减规律

沟1(图4a、图4b)的监测期为2022年7月14日至9月30日,累计降雨量296.03 mm,降雨日数35 d。降雨过程主要集中于7月底至8月上旬,其中7月26日—28日为主要降雨过程,累计降雨76.74 mm;7月28日出现最大日降雨量40.13 mm,且7月27日记录到监测期最大雨强18.83 mm/h。8月4日—5日亦发生强降雨过程,累计降雨量为50.87 mm。沟3(图4c、图4d)的监测期为2025年7月29日至9月30日,累计降雨量154.57 mm,降雨日数27 d。该时段降雨以间歇性过程为主,其中8月2日出现最大日降雨量33.67 mm,并同步出现最大雨强17.71 mm/h。沟4(图4e、图4f)的监测期为2025年7月15日至9月30日,累计降雨量250.79 mm,降雨日数40 d。在7月22日—27日发生持续性降雨过程,累计降雨量达102.83 mm,其中7月26日出现最大日降雨量44.96 mm。

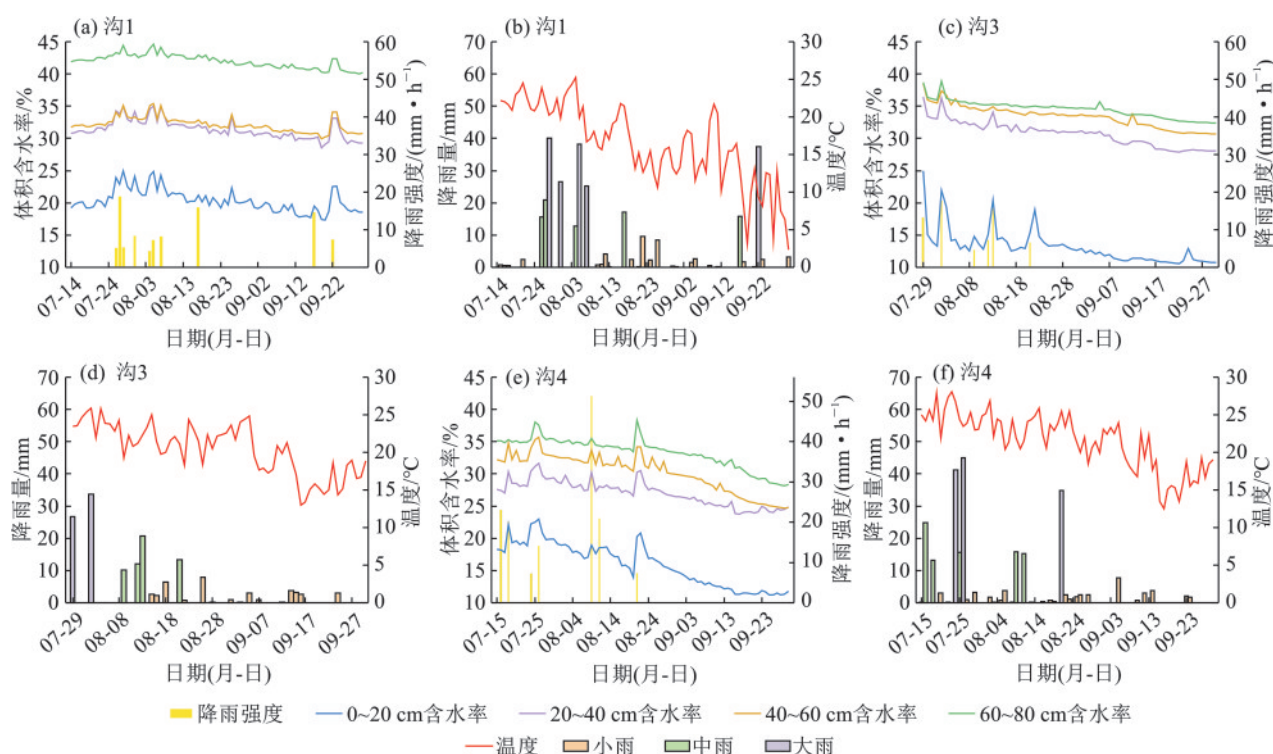


图4 监测点气象水文数据
Fig.4 Meteorological and hydrological data at monitoring sites

沟1、沟3和沟4的体积含水率的变化呈现表层含水率响应强而深层响应弱,雨后表层含水率快速下降而深层含水率缓慢变化的规律。该规律是从降雨补给到水分再分配再到排水与蒸散消耗的典型过

程^[25]。含水率对降雨的响应随土层深度增加而减弱,以代表性降雨事件为例,沟3在8月2日的降雨过程中,0~20 cm土层含水率的最大日增幅为8.66%,而20~40、40~60、60~80 cm土层含水率最大日增幅

分别为 3.21%、1.82%、2.90%，呈现随土层深度增加而减小的特征。降雨结束后，表层含水率的下降速率普遍高于深层，其原因可能在于表层主要受快速排水与蒸散过程共同控制，而深层更多体现为土体储水释放及缓慢排水的影响。

2.3 储水量衰减系数

沟 1、沟 3 和沟 4 在 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层的储水量递减段拟合结果(图 5)可以看出，降雨结束后储水量(S)随相对天数(t)呈持续衰减趋势，且指数模型(公式 4)能够较好地描述该衰减过程。该指数衰减形态表明，降雨后水分进入以重力排水与水分再分配为主导的消退阶段。初期土体含水状态较高、连通水通道较充分，水分下渗及侧向排水与再分配速率较快。随时间推移，土体逐渐脱湿，排水驱动力与连通水通道同步减弱，储水量下降速率随

之放缓，从而呈先快后慢的衰减特征。

3 处切沟的储水量衰减均表现出一致的垂直分异规律(表 4)， K_d 随土层深度的增加而减小。沟 1 储水量衰减系数由 0~20 cm 的 0.054 递减至 60~80 cm 的 0.010；沟 3 由 0.082 递减至 0.006；沟 4 由 0.036 递减至 0.006。表明随着土层深度加深，储水量的消退速度整体减缓。从过程上看，深层土体对降雨扰动的响应更平缓：一方面，水分向下或向侧向排出的路径更长，驱动水分迁移的梯度相对减弱，使得水分外排速度降低；另一方面，降雨结束后缓慢的水分再分配与持续性排水过程的叠加，使得深层土体储水量的日尺度波动较小，从而缓慢消退。各切沟对比显示，20~40 cm 及更深深度，沟 1 的 K_d 整体高于沟 3、沟 4，说明沟 1 深层的储水量消退更快，而沟 3 在除表层外各深度的储水量衰减系数(K_d)都最小，表现为更缓慢的水分消退过程。

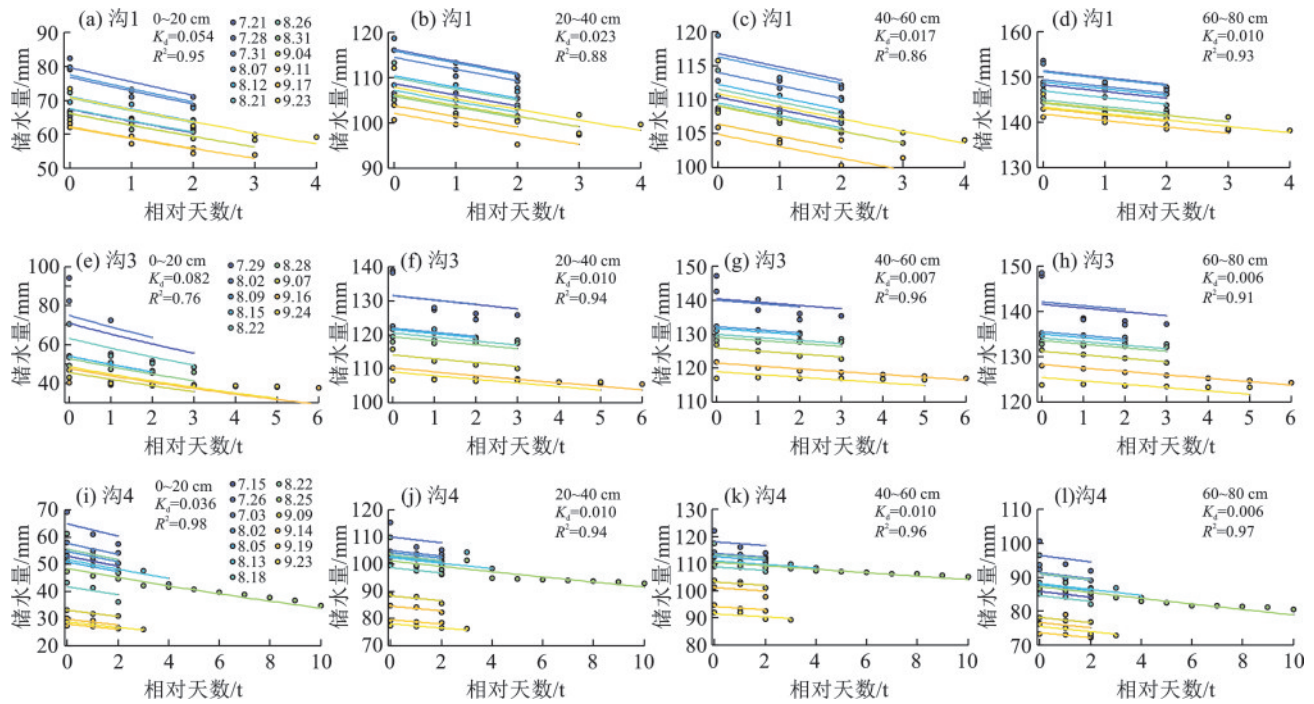


图 5 储水量衰减系数拟合
Fig.5 Fitting of water storage decay coefficient

表 4 储水量衰减系数(K_d)拟合值						
Table 4 Fitting values of water storage decay coefficient (K_d)						
土层深度/cm	沟 1		沟 3		沟 4	
	K_d	R^2	K_d	R^2	K_d	R^2
0~20	0.054	0.95	0.082	0.76	0.036	0.98
20~40	0.023	0.88	0.010	0.94	0.010	0.94
40~60	0.017	0.86	0.007	0.96	0.010	0.96
60~80	0.010	0.93	0.006	0.91	0.006	0.97
0~40 (验证)	0.035	0.92	0.028	0.84	0.019	0.97

2.4 储水量预测模型及验证

通过日尺度的储水量预测模型计算储水量(图 6)，沟 2(a~f)、沟 3(g~j)、沟 4(k~n)均表现出相同规律，即储水量在降雨补给作用下发生抬升，随后以指数形式消退，体现出从降雨补给到排水消退的典型事件响应。由于起始时刻的储水量(S_0)由实测值直接赋值，该时刻 4 种降雨输入参数的预测值相同，纳入误差统计将人为降低误差并掩盖差异。因此，在逐点位误差评价中将其剔除，仅在剩余记录上计算储水量实测值与预测值的平均绝对误差，并以平

均绝对误差最小者判定该点位更接近的储水量预测线。表 5 结果表明,在 14 个实测点位中,85.7% 的点位最优降雨输入参数为 I_{1h} ,仅有 14.3% 的点位最优降雨输入参数为 I_{2h} 。

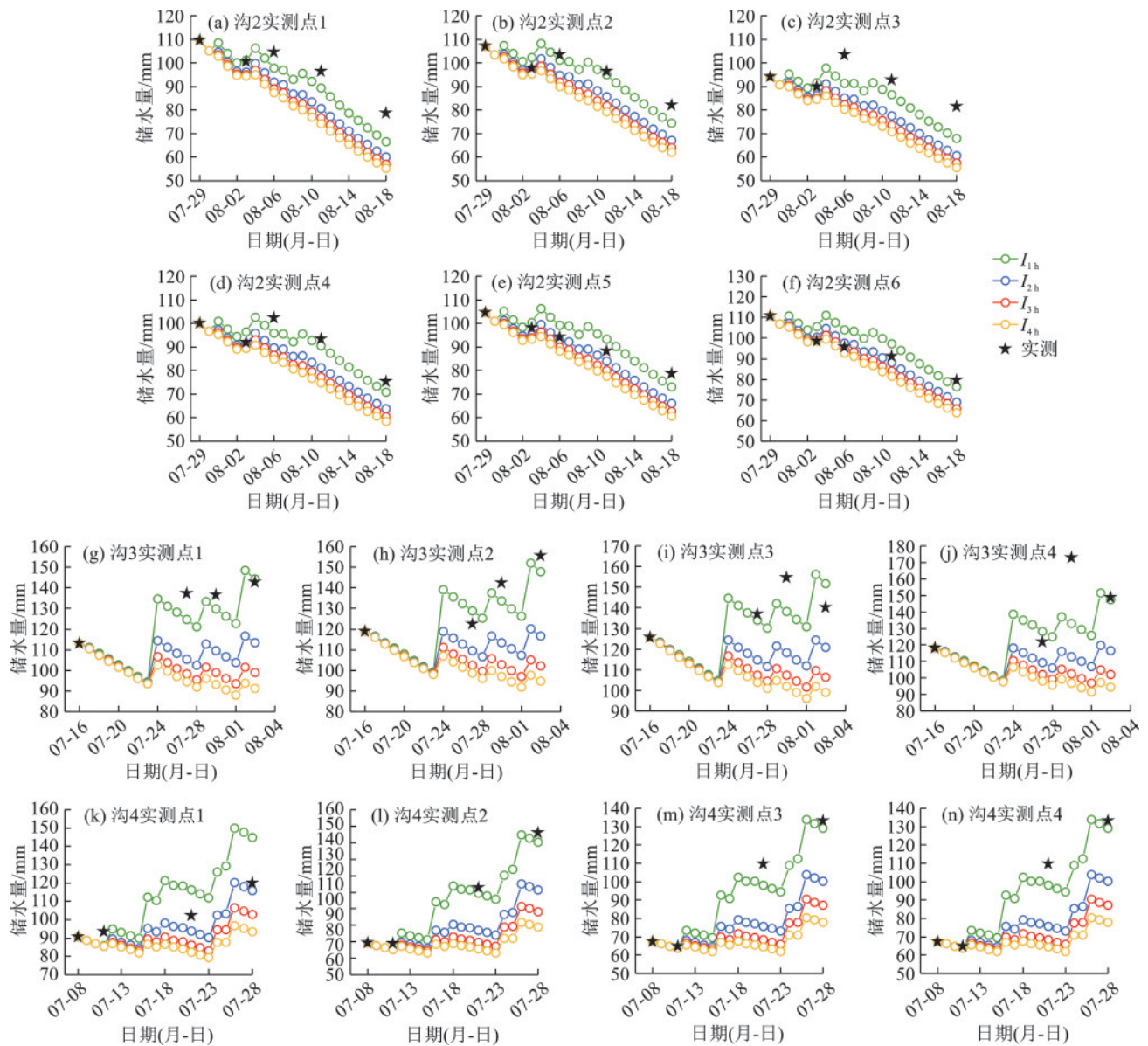


图 6 储水量预测值与实测值对比

Fig.6 Comparison between predicted and measured values of water storage

表 5 实测点平均绝对误差

Table 5 Mean absolute error (MAE) at monitoring sites

MAE/ mm	沟 2						沟 3				沟 4			
	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6	点 1	点 2	点 3	点 4	点 1	点 2	点 3	点 4
I_{1h}	6.5	4.0	8.3	4.6	4.4	6.2	7.1	7.7	10.4	6.0	15.5	4.0	5.4	2.9
I_{2h}	12.9	8.6	14.4	9.2	5.3	4.4	29.4	26.8	26.0	25.0	6.8	21.2	22.6	15.2
I_{3h}	15.6	11.4	17.3	12.1	8.1	5.6	40.2	37.6	36.8	35.8	13.6	28.0	29.4	22.0
I_{4h}	17.3	13.2	19.1	13.8	9.9	7.1	45.8	43.2	42.4	41.5	18.1	32.5	33.9	26.4

由图 7 可知,沟 2、沟 3 和沟 4 储水量预测值与实测值进行 1:1 检验结果。总体上,模型在 3 组数据上的相对误差为 5.6%~6.5%,整体相对精度表现较稳定、误差水平可控。其中沟 2 绝对误差最小、稳定性最好;沟 3 平均绝对误差偏大;沟 4 均方根误差偏高,说明存在少量较大误差点需进一步优化。经检验,该模型能

够在事件尺度上再现降雨后短期储水量的演化趋势。部分点位出现偏离,表明储水量的实际变化除受 K_d 与 I_{th} 控制外,还可能受到初始含水状态差异、降雨历时结

构与过程内分配等因素的共同影响。总体而言,该预测模型以 K_d 表征储水量的消退、以 I_{th} 表征降雨输入,实现对降雨后储水量短期演化的参数化描述。

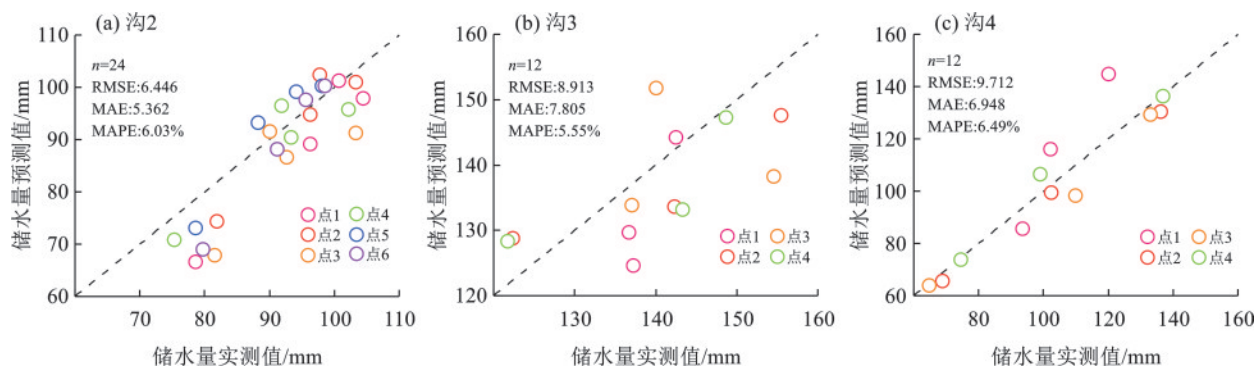


图 7 1:1 检验

Fig.7 1:1 validation

3 讨论

3.1 土壤水分滞后与衰减特性

SWCC 曲线滞后效应强弱呈沟 1 $\approx$ 沟 2 $<$ 沟 3 $<$ 沟 4 的总体趋势,表明沟 3 和沟 4 土体在脱湿吸湿过程中具有更强的路径依赖性。在切沟沟头区域,基质吸力深刻影响着土体稳定性。而 SWCC 的滞后效应使沟头水分呈显著的吸湿-脱湿过程路径依赖。降雨开始时,常表现为吸力快速衰减而含水量增长相对滞后,导致基质吸力短时间内显著降低,使沟头陡坎更易塌陷。雨停后水分状态并不沿原路径迅速恢复,基质吸力恢复与含水量回落具有明显时滞,使沟头失稳风险在降雨结束后仍可持续或进一步发展。在日尺度建模中,本文通过有雨日取含水率最大值,无雨日取含水率最小值的含水率处理方式区别吸湿和脱湿路径及在雨后储水量消退段上反演储水量衰减系数(K_d),从而实现对滞后效应的隐式表征。雨后沟头土壤储水量随时间呈指数型衰减,土壤储水量在初期下降迅速而后期趋缓,表现为饱和带排水过程由重力驱动向毛管束缚主导的转变。该衰减规律与 Horton^[26]入渗模型假定的土壤入渗能力随时间指数下降的理论一致。储水量衰减系数随土层深度增加而减小,且在 20~80 cm 土层内沟 1 储水量衰减系数显著大于沟 3 和沟 4,此现象可能与东北黑土区耕作层与犁地层的剖面结构及土壤优先流有关^[27-28]。沟 1 横穿林带,根系及腐根根孔易形成连通生物孔隙并触发优先流,使降雨入渗后的深层补给与重力排水更充分,因而在 20~80 cm 土层表现为更快的储水量消退。沟 3、沟 4 位于农田内部,长期耕作可能在耕作层底部形成致密犁底层,导致水分入渗困难,深层水分

衰退。拟合结果表明,沟头 0~20 cm 土层 K_d 高于其他 3 种深度土层 K_d ,佐证了深层土壤蓄水消退更缓慢、长时间保持较高含水率的认识^[29],且与侵蚀黑土的土层厚度和紧实度显著影响入渗性能,表层饱和含水量和渗透速率均高于深层土壤的试验结果^[30]一致。因此, K_d 值的垂直变化可作为评判土壤内部水力连通性的重要指标。

3.2 储水量预测模型及其验证

通过构建日尺度的沟头储水量预测模型,以储水量初值(S_0)、衰减系数(K_d)及降雨输入参数(I_{th})为参数,实现对降雨事件后土壤储水量变化的模拟。从实测点平均误差分析可知,不同监测点的降雨输入参数存在差异。该差异可能与地形汇流条件和侵蚀扰动程度影响下,各点位有效入渗能力不同有关。沟头附近或受侵蚀严重的点位,地形汇流与土壤结构扰动可能入渗更快,使土壤储水量对峰值雨强更为敏感,该位置采用 I_{th} 作为降雨输入参数能更准确地预测储水量。而在沟 2 点位 6,沟 4 点位 1 区域,短时峰值雨强被坡面入渗和水分再分配作用而削弱,该位置采用 I_{2h} 作为降雨输入参数能更准确地预测储水量。因此,在开展土壤储水量预测时,入渗性能好的点位应选取 I_{th} 为降雨输入参数,如沟头或受侵蚀严重的点位;而入渗性能差或有强烈水分再分配点位应选取 I_{2h} 为降雨输入参数,得到的预测值更接近真实值。对模型所得的储水量预测值与实测值进行 1:1 检验,用统计学指标验证模型有效性。结果显示,储水量预测值与实测值的相对误差为 5.6%~6.5%,表明模型能够较好地再现降雨后短期土壤储水量的演化过程。

4 结 论

1)通过对比脱湿阶段进气值发现,启动脱饱和排水难易程度呈沟1 $\approx$ 沟2<沟4<沟3的趋势。SWCC曲线滞后效应强弱趋势为沟1 $\approx$ 沟2<沟3<沟4一致。滞后效应越强,排水时同一基质吸力下保水能力更强,表现为储水量衰减缓慢、衰减系数偏小,对降雨响应更迟缓。

2)降雨结束后沟头储水量随相对天数呈持续指数衰减趋势,表明降雨后水分进入以重力排水与水分再分配为主导的消退阶段逐渐转变为毛管束缚、导水率降低的缓慢消退阶段。3处切沟的储水量衰减均表现出一致的垂直分异规律: K_d 随土层深度增加而减小。

3)日尺度储水量预测模型能够较好地再现降雨后短期储水量演化,预测值与实测值的相对误差为5.6%~6.5%。在降雨输入参数选取上,85.7%的点位以 I_{1h} 匹配最佳,14.3%的点位以 I_{2h} 匹配最佳;其中,入渗性能好的点位宜采用 I_{1h} ,入渗性能差或水分再分配强烈的点位宜采用 I_{2h} 。

参考文献:

- [1] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2022,36(2):1-12.
Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1-12.
- [2] 水利部.2024年中国水土保持公报[EB/OL].[2025-03-21].
https://swcc.mwr.gov.cn/gonggao/202503/t20250321_1878440.htm.
Ministry of Water Resources. China soil and water conservation bulletin 2024[EB/OL].[2025-03-21].https://swcc.mwr.gov.cn/gonggao/202503/t20250321_1878440.htm.
- [3] 陈家宙,何阳波,高钰淇,等.1970—2021年典型黑土区侵蚀沟损毁耕地速度与发育阶段[J].农业工程学报,2023,39(12):51-59.
Chen Jiazhou, He Yangbo, Gao Yuhao, et al. Farmland damage speed and development stage of gully erosion in typical black soil region from 1970 to 2021[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(12): 51-59.
- [4] Wen Y, Liu B, Yu Q, et al. Response of soil moisture to prewinter conditions and rainfall events at different distances to gully banks in the mollisol region of China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2024, 49(6): 1858-1868.
- [5] 宋爽,范昊明,牛天一.东北黑土区不同季节侵蚀沟形态发育比较分析[J].水土保持学报,2022,36(1):18-23.
Song Shuang, Fan Haoming, Niu Tianyi. Comparative analysis of the development the geometric forms of gully in different seasons in black soil area of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 18-23.
- [6] 张光辉.切沟侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报,2020,34(5):1-13.
Zhang Guanghui. Advances and prospects for gully erosion researches [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 1-13.
- [7] 杨润泽,张岩,李坤衡,等.基于无人机调查的黑土区浅沟侵蚀对降雨变化的响应及预测模型[J].农业工程学报,2025,41(18):92-100.
Yang Runze, Zhang Yan, Li Kunheng, et al. Response of ephemeral gully erosion to rainfall variability and its prediction model based on UAV survey in the black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(18): 92-100.
- [8] Tang Jie, Xie Yun, Wu Yongqiu, et al. Influence of precipitation change and topography characteristics on the development of farmland gully in the black soil region of Northeast China[J]. Catena, 2023, 224: e106999.
- [9] Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs[J]. Catena, 2003, 50(2/4): 91-133.
- [10] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59.
Zheng Fenli, Xu Ximeng, Qin Chao. A review of gully erosion process research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 48-59.
- [11] 杨丽娟,王春梅,张春妹,等.基于遥感影像研究极端暴雨条件下新成切沟发生发展规律[J].农业工程学报,2022,38(6):96-104.
Yang Lijuan, Wang Chunmei, Zhang Chunmei, et al. Occurrence and development of newly formed gullies under extreme rainstorm conditions using remote sensing images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 96-104.
- [12] 黄萌,范昊明.辽宁省侵蚀沟发育特性及地形分异特征[J].水土保持学报,2017,31(5):93-98.
Huang Meng, Fan Haoming. Development characteristics and topographic differentiation features of erosion gully in Liaoning Province of China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 93-98.
- [13] Tang Jie, Liu Gang, Xie Yun, et al. Annual variation of

- ephemeral gully erosion in a cultivated catchment [J]. *Geoderma*, 2021, 401: e115166.
- [14] Tang Jie, Xie Yun, Liu Chuan, et al. Effects of rainfall characteristics and contour tillage on ephemeral gully development in a field in northeastern China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 218: e105312.
- [15] Dong Yifan, Wu Yongqiu, Qin Wei, et al. The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes [J]. *Catena*, 2019, 182: e104146.
- [16] Ma Chao, Wang Shoupeng, Zheng Dongshuo, et al. Understanding soil loss in mollisol permanent gully head cuts through hydrological and hydromechanical responses [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2025, 29 (4) : 823-839.
- [17] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [18] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513-522.
- [19] 王升, 包小怀, 容莹, 等. 降雨强度对西南喀斯特坡地土壤水分及产流特征的影响 [J]. *农业现代化研究*, 2020, 41(5): 889-898.
- Wang Sheng, Bao Xiaohuai, Rong Ying, et al. Study on soil moisture variation and runoff characteristics on typical karst slope under different rainfall intensities [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(5): 889-898.
- [20] Wilson R C, Wicczorek G F. Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 1995, 1(1): 11-27.
- [21] Baum R L, Godt J W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA [J]. *Landslides*, 2010, 7(3): 259-272.
- [22] 王寿彭, 马超, 郑栋硕, 等. 东北黑土区鹤北流域不同质地类型切沟沟头水-力学性质比对分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(4): 87-95.
- Wang Shoupeng, Ma Chao, Zheng Dongshuo, et al. Comparative analysis of the hydro-mechanical properties of different texture types in the Hebei River basin of Northeast China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(4): 87-95.
- [23] 霍思远, 余龙彪, 王登, 等. 土壤水分特征曲线滞后效应研究进展 [J]. *土壤通报*, 2025, 56(4): 1178-1188.
- Huo Siyuan, Yu Longbiao, Wang Deng, et al. Research advances in hysteresis effect of soil water characteristic curve [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(4) : 1178-1188.
- [24] 沈荣开. 非饱和土壤水运动滞后效应的研究 [J]. *土壤学报*, 1993, 30(2): 208-216.
- Shen Rongkai. Effect of hysteresis on water movement in unsaturated soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30 (2): 208-216.
- [25] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 等. 流动沙丘降雨入渗和再分配过程 [J]. *水利学报*, 2006, 37(2): 166-171.
- Liu Xinping, Zhang Tonghui, Zhao Halin, et al. Infiltration and redistribution process of rainfall in desert mobile sand dune [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37 (2): 166-171.
- [26] Horton R E. The Role of infiltration in the hydrologic cycle [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1933, 14(1): 446-460.
- [27] 黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淇, 等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响 [J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 998-1008.
- Huang Yiting, Chen Junxi, Gao Yuhao, et al. Effects of long-term tillage on hydraulic properties of typical black soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 998-1008.
- [28] Wen Yongfu, Li Mengzhen, Gao Peng, et al. Soil physicochemical properties and roots promoted preferential flow development after vegetation restoration [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 659: e133349.
- [29] Ji Chenlin, Wang Tianyi, Bao Han, et al. Time series analysis and temporal stability of shallow soil moisture in a high-fill slope of the Loess Plateau, China [J]. *Water*, 2025, 17(8): e1140.
- [30] 李若凡, 谢云, 辛艳, 等. 东北黑土区不同侵蚀程度土壤入渗特征与模拟 [J]. *中国水土保持科学 (中英文)*, 2024, 22(2): 17-24.
- Li Ruofan, Xie Yun, Xin Yan, et al. Soil infiltration characteristics and simulation of different eroded degrees in the black soil region of Northeast China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(2): 17-24.