

解冻期坡面降雨入渗特征及模拟试验研究

程圣东¹, 张辉², 李占斌¹, 鲁克新¹, 任宗萍¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 陕西西部联盟生态股份有限公司, 西安 710075)

摘要: 通过室内人工模拟降雨试验和水量平衡方法, 研究解冻期坡面降雨入渗规律。试验处理包括 4 个初始解冻深度(0, 2, 4, 6 cm)和 3 个降雨强度(0.6, 0.9, 1.2 mm/min)。结果表明:(1)在坡面的降雨入渗过程中, 随降雨历时的延长, 入渗率呈由高到低的变化, 波动性明显;(2)坡面初始入渗率受降雨强度的影响较大, 0.9, 1.2 mm/min 雨强下的初始入渗率显著大于 0.6 mm/min 下的初始入渗率($p < 0.05$); 不同初始解冻深度下的稳定入渗率相差较小, 平均入渗率的变化趋势与稳定入渗率的变化趋势相似, 均随初始解冻深度的增加呈现先减小后增大, 临界解冻深度为 4 cm; 初始解冻深度为 6 cm 时的累计入渗量显著大于解冻深度为 0, 2, 4 cm 的累计入渗量($p < 0.05$); 累计入渗量在 0.6 mm/min 雨强下随初始解冻深度的增加而增加, 而在 0.9, 1.2 mm/min 雨强下呈先减小后增大的变化趋势, 临界解冻深度分别为 2, 4 cm;(3)采用 Kostiakov 模型、Horton 模型、蒋定生模型和 Philip 模型对试验结果进行模拟后发现, Horton 模型最能反映解冻期坡面土壤降雨入渗的特征。研究结果可为揭示解冻期产流机制变化以及土壤侵蚀规律提供参考。

关键词: 解冻期; 降雨入渗; 模型模拟; 黄土高原

中图分类号: S157.1; P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0012-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.003

Study on Rainfall Infiltration Characteristics and Simulation Test of Slope Surface During Thawing Period

CHENG Shengdong¹, ZHANG Hui², LI Zhanbin¹, LU Kexin¹, REN Zongping¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. Shaanxi West Ecological Alliance Company Limited By Shares, Xi'an 710075)

Abstract: Through indoor simulated rainfall experiment and water balance methods, the rainfall infiltration law of slope during thawing period was studied. The experimental treatments included 4 initial thawing depths (0, 2, 4 and 6 cm) and 3 rainfall intensities (0.6, 0.9 and 1.2 mm/min). The results showed that: (1) The infiltration process varied from high to low with the increase of rainfall duration. (2) The initial infiltration rate of slope surface was greatly affected by rainfall intensity. The initial infiltration rate under rainfall intensity of 0.9 mm/min was significantly higher than that of 0.6 mm/min ($p < 0.05$), and the steady infiltration rate at different initial thawing depths was smaller than that at different initial thawing depth. The change trend of average infiltration rate and the steady infiltration rate decreased firstly and then increased with the increase of initial thawing depth and the critical thawing depth was 4 cm. The cumulative infiltration amount at the initial thawing depth of 6 cm was significantly larger than that at 0 cm, 2 cm and 4 cm, and the cumulative infiltration amount increased with the increase of thawing depth under the rainfall intensity of 0.6 mm/min. However, under the rain intensity of 0.9 and 1.2 mm/min, the critical thawing depth was 2 cm and 4 cm, which decreased first and then increased. (3) By using the Kostiakov, Horton, Jiang Dingsheng and Philip models to simulate the experimental results, it was found that Horton model could best reflect the characteristics of rainfall infiltration on slope during thawing period. These findings were expected to reveal the change mechanism of runoff production and soil erosion during the thawing period.

Keywords: thawing period; rainfall infiltration; model simulation; Loess Plateau

收稿日期: 2018-03-02

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504704); 国家自然科学基金项目(41601291, 51609196); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM4017)

第一作者: 程圣东(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: xautcsd@163.com

通信作者: 鲁克新(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事旱区水文与水蚀动力过程研究。E-mail: lkx2942@163.com

季节性冻土是指冬季冻结、夏季全部融化的土层,是一种含有冰晶的特殊土水体系,在中国分布面积约占全国国土面积的 53.5%^[1-2]。冻融土壤入渗能力的研究成果在农业生产灌溉方面应用较广^[3-6],对于探索科学合理可行的土壤水资源高效利用措施具有重要意义^[7]。已有研究^[8]表明,冻融土壤入渗能力随着土壤含水率的增大而减小,其关系符合幂函数关系^[8]。邢述彦^[9]通过试验研究认为,入渗水温对冻土入渗规律影响显著,冻土的入渗能力随入渗水温的升高而增强;陈军锋等^[10]基于田间入渗试验,对 5 种不同地表条件下季节性冻融土壤入渗能力进行研究后认为,0—10 cm 土层土壤含水率对入渗能力的影响最显著,裸地土壤温度对入渗能力的影响不显著,而冬小麦地和人工草地土壤入渗能力受气温的影响较显著。因此,季节性冻融土壤的入渗能力是由多种因素共同决定的。土壤质地、容重、含水量、地温和水温都是影响冻融土壤入渗能力的主要因素^[11]。

近年来,随着对土壤侵蚀机理研究的进一步深入,关于解冻期土壤入渗及侵蚀的研究已成为热点。解冻期土壤侵蚀是发生在冬春季节的一种土壤侵蚀形式,是指冻融侵蚀、水力侵蚀及重力侵蚀相互作用下发生的一种侵蚀现象^[12]。我国黄土丘陵区地处温带内陆,年 0℃以下天数约 105~125 天,大致是年总天数的 1/3。多年平均降水量集中在 450~550 mm,具备季节性冻融作用发生的气候条件^[13]。通常情况下,该区土壤冻融前即为本年水力侵蚀的结束,而冻融后则是来年水力侵蚀的开始^[14]。冻土具有明显的减渗作用,减渗是由于土壤水分相变导致的土壤水力传导度的减小所引起^[11]。黄土丘陵区是我国主要的冻融侵蚀分布区域之一,普遍具有深厚而为时较长的季节性冻层,深厚的冻层阻塞了土壤孔隙,加之融解的时间较长,当春季表层融解而深处尚未融解的情况下,未融解部分就形成了不透水层^[15],融化后多余的水体无法从下覆的未融化的冻土层中排出,导致水体再度被土体吸收,使得土壤逐渐处于饱和状态,土体的抗剪强度降低,稳定性也随之下降,可蚀性增加^[16]。因此,研究解冻期土壤水分入渗规律对揭示解冻期水力侵蚀动力学机理具有重要意义。

以往的研究^[17-20]侧重于对解冻期土壤侵蚀的研究,而对于该时期土壤降雨入渗特性方面的研究较少。研究土壤解冻期降雨水分入渗规律,不仅是探讨区域不同初始解冻深度坡面地表产流产沙的前提和基础,也是为改善该时期水资源利用效率和水土保持防治提供重要的理论支撑。鉴于此,本文在前人研究

的基础上,以黄土丘陵区黄绵土为研究对象,通过室内人工模拟降雨试验,研究不同初始土壤解冻深度下坡面入渗过程以及初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和累计入渗量等参数特征,以期揭示解冻期坡面产流机制变化以及土壤侵蚀规律提供参考。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

试验用土取自陕西省绥德县王茂庄乡王茂沟小流域,取土时间为 2016 年 8 月。试验前将土样风干,过 5 mm×5 mm 的筛,剔除植物根系、石块等杂物。土壤干容重为 1.3 g/cm³,土壤饱和含水率为 46.41%,机械组成为黏粒 0.20%,粉粒 72.01%,沙粒 27.79%。

试验装置主要由冻土系统、试验土槽和降雨系统 3 部分组成。冻土系统采用西安理工大学的冻融试验系统;试验土槽为木制不透水结构,边角及外围用角铁锚固,底部配有可移动的试验小车,土槽长 200 cm,宽 75 cm,深 30 cm,下端连接用于收集径流、泥沙样品的集流槽(图 1)。试验采用下喷式模拟降雨系统,根据不同的降雨强度选择不同型号的喷头,有效降雨覆盖面积约为 4.5 m×4.5 m,降雨高度为 5.2 m,降雨强度变化范围为 0.5~2.0 mm/min,降雨均匀度均在 85%以上。

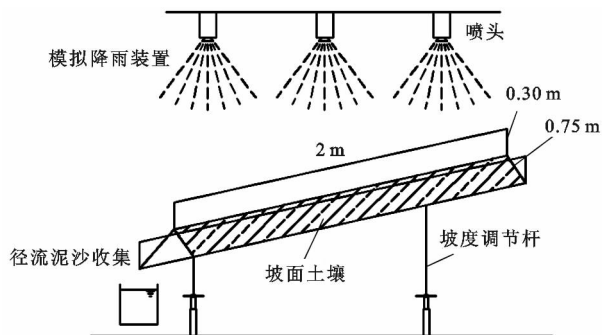


图 1 模拟降雨装置与试验土槽的结构示意图

1.2 降雨试验设计与入渗特征参数确定

1.2.1 降雨试验设计 试验在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室雨洪侵蚀大厅完成,开始于 2016 年 9 月下旬,结束于 10 月下旬。试验设定的土壤初始重量含水量为 15%,坡面坡度设定为 15°;依据文献^[21]分别设定 0, 2, 4, 6 cm 4 个初始解冻深度,依据文献^[22]设置 0.6, 0.9, 1.2 mm/min 3 个雨强。供试土壤按 1.3 g/cm³ 的干容重分层装土 25 cm。设定降雨历时为坡面产流后 60 min;坡面产流后,每 1 min 在集流槽接 1 次水沙样品;降雨试验结束后,烘干样品并称重,计算每 1 min 的坡面产流量和产沙量。

初始解冻深度的控制采用冻融试验系统冻结和

室内融解的方法:即在填装好土层之后,将土槽所在的移动小车推入冻融试验系统中,在 $-18\sim-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下连续冻结 24 h 以上以保证土壤冻透之后,再将试验小车推出冻融试验系统,并放在室内模拟降雨器下,在室温下解冻到试验设计所要求的初始解冻深度,初始解冻深度的测量采用直径为 2 mm 的细钢丝针测定,测定过程参考文献[23]中的方法,具体为:在长度为 200 cm、宽度为 75 cm 的试验土槽上,距离坡底出水口 40,100,160 cm 的位置选择 3 条平行于槽宽的线,距离土槽一侧垂直于边壁 15,30,45,60 cm 处分别均匀选取 4 个点,总共选取 12 个点;在解冻的过程中,考虑到黄绵土的比热较小、土体温度变化较快的特点,每隔 25 min 用细钢针垂直插入冻土坡面,快速测量出不同位置的初始解冻深度并求其平均值,当其平均值达到试验设计的初始解冻深度时,即坡面的平均初始解冻深度达到 0 或 2 cm 或 4 cm 或 6 cm 时,则认为初始解冻深度满足试验要求,即可进行下一步的模拟降雨试验。由于试验条件的限制,在降雨时的室内模拟降雨温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,而室内温度变化范围为 $(15\pm 2.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.2 入渗量计算 降雨历时设定为坡面产流后 60 min;坡面产流后,每 1 min 在集流槽接 1 次水沙样品;降雨试验结束后,烘干样品并称重,计算每 1 min 的坡面产流量和产沙量。入渗率按水量平衡原理反推法进行推算,具体计算公式为:

$$f=(PE-W)/t \quad (1)$$

式中: f 为研究历时内的坡面入渗率(mm/min); PE 为研究历时内降雨的有效降雨量(mm); W 为研究历时内的径流量(mm); t 为研究历时(min)。

1.2.3 入渗参数确定 入渗过程通常用初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率和累计入渗量等参数来描述。本文采用 Kostikov 模型模拟证实,确定产流后 2 min 的平均入渗率可作为初始入渗率;稳定入渗率是指入渗率随入渗时间延长而趋于一个相对稳定的值,稳定入渗率可用降雨产流结束前数分钟的平均入渗率值间接反映;平均入渗率反映整个降雨产流过程中径流与入渗的对比关系,该值为入渗总量除以入渗历时;累计入渗量是坡面产流过程中渗入土壤中的总水量。

1.2.4 入渗模型模拟 关于土壤水分的入渗模拟方面,不同学者提出了很多描述土壤入渗速率随时间变化的入渗公式。本研究采用 4 个常用入渗模型对降雨入渗试验结果进行模拟与评价。

(1)Kostiakov 模型。1932 年,Kostiakov 提出了以时间和初始入渗率为参数的土壤入渗率公式:

$$f(t)=f_1 t^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min);

f_1 为第 1 个时段内土壤入渗速率(mm/min); α 反映土壤入渗的时间效应。该式为经验公式,应用简单方便。

(2)Horton 模型。1940 年,Horton 建立一个既可描述土壤入渗特征又包含水分入渗过程的物理概念模型,Horton 模型的表达式为:

$$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); f_0 为初始入渗率(mm/min); f_c 为稳定入渗率(mm/min); k 为入渗衰减指数。

(3)Philip 模型。1957 年,Philip 对 Richards 方程进行了深入的研究,研究出该方程的解析解。该模型为:

$$f(t)=1/2St^{-1/2}+A \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); S 为吸湿率(mm/min); A 为稳定入渗率,但只有入渗时间很长时 A 才趋近于 Horton 模型中的稳渗率 f_c 。

(4)蒋定生模型。1986 年,蒋定生利用大量野外实测资料,通过分析比较,得出了适用于黄土区的积水入渗公式:

$$f(t)=f_c+(f_1-f_c)/t^{\alpha} \quad (5)$$

式中: $f(t)$ 、 t 分别表示瞬时入渗速率(mm/min)和累计入渗时间(min),该公式适用于积水条件下土壤入渗,可能与实际降雨情况有一定差距; f_1 、 f_c 分别为第 1 min 结束时刻的入渗速率及稳定入渗速率(mm/min)。

1.2.5 数据分析与处理方法 数据分析时间为 2017 年 6 月。试验数据采用 Excel 2013 进行录入,数据模拟及方差分析采用 SPSS 18.0 完成,绘图采用 Origin 完成。

2 结果与分析

2.1 解冻期坡面入渗过程

从图 2 可以看出,坡面土壤入渗率随产流历时延长基本呈下降趋势,且下降过程中波动明显;在产流前期的入渗率最大,在降雨强度、初始解冻深度、土壤含水量等的综合影响下,入渗率波动下降并趋于一个相对稳定的值。对比不同雨强下的入渗率变化特征,可以看出,相对于 0.6,0.9 mm/min 雨强下的入渗率变化,1.2 mm/min 雨强下的入渗率下降最快,在 15 min 左右即达到相对稳定值。而观察同一雨强不同初始解冻深度下的入渗率随解冻深度变化并未表现出明显规律。

2.2 坡面入渗参数特征及影响因素

入渗过程通常用初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率和累计入渗量等参数来描述。表 1 和图 3 分别表示该 4 个参数的统计值。

结合表 1 和图 3 可以看出,相对于 0.6 mm/min 雨强,0.9,1.2 mm/min 雨强下的初始入渗率较大,经方差分析发现,0.6 mm/min 下的初始入渗率分别

与 0.9, 1.2 mm/min 下的初始入渗率呈现显著性差异 ($p < 0.05$); 而不同解冻深度下的初始入渗率并无明显规律。观察不同处理下的稳定入渗率发现, 3 个雨强下的稳定入渗率随解冻深度的增加均呈现先减小后增大的趋势。除了解冻深度为 2 cm 之外, 不同解冻深度下的稳定入渗率相差较小, 平均入渗率与稳定入渗率随初始解冻深度的增加均呈现先减小后增大的趋势, 临界解冻深度为 4 cm。

由图 3 可以看出, 解冻深度为 6 cm 时的累计入渗量显著大于解冻深度为 0, 2, 4 cm 的累计入渗量 ($p < 0.05$), 且后三者之间的累计入渗量相差较小。观察同一雨强下的累计入渗量发现, 在 0.6 mm/min 雨强下的累计入渗量随解冻深度的增加而增加, 而在 0.9, 1.2 mm/min 雨强下呈先减小后增大的趋势, 临界解冻深度分别为 2, 4 cm。

由表 2 可以看出, 初始解冻深度与累计入渗量呈显著的正相关关系; 降雨强度与初始入渗率呈现极显著的正相关关系。根据超渗产流理论, 降雨强度大于下垫面的下渗能力时, 地表产流。对于本研究来说, 在同一解冻深度下, 降雨强度越大, 对地表提供的供水越多, 则初始入渗率越大, 故降雨强度与初始入渗率呈现极显著的正相关关系; 初始解冻深度越深, 冻层上部土壤越厚, 入渗能力相对较大, 降雨水分湿润峰所能达到的深度越深, 累计入渗量越大, 故初始解冻深度与累计入渗量呈显著的正相关关系。当地表(界面)提供足够的水量补给时, 下垫面的情况成为决定产流量大小的主导因素, 而对于本研究来说, 坡面的平均入渗率虽与解冻深度正相关但并不显著, 这说明在降雨过程中, 降雨导致解冻深度的不断加深在一

定程度上降低了初始解冻深度对坡面水分入渗过程的影响作用。坡面的稳定入渗率主要取决于土体自身物理和化学性质, 故其受解冻深度和降雨强度的影响较小。

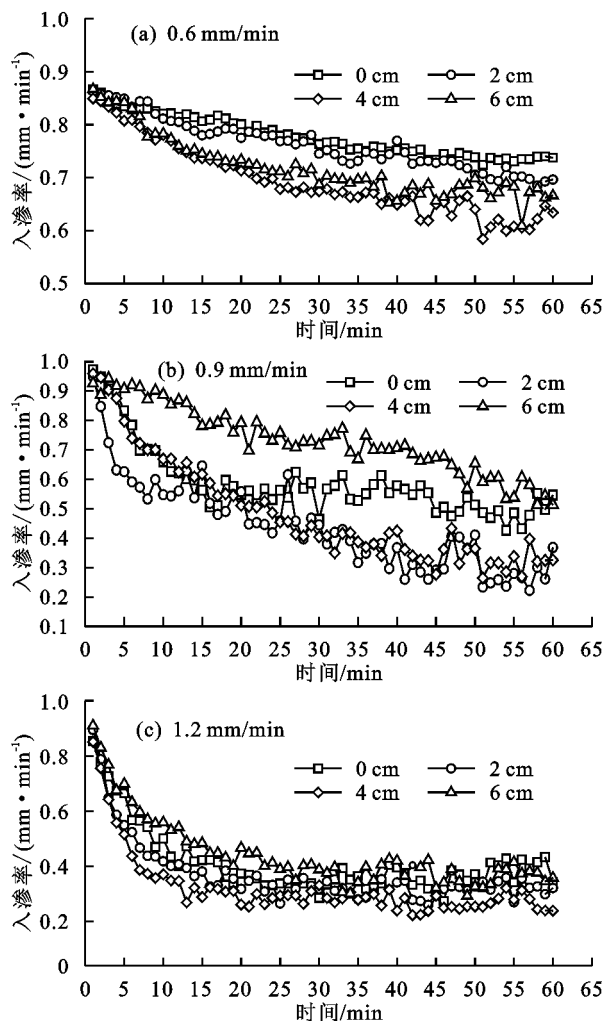


图 2 不同初始解冻深度下坡面土壤入渗率变化过程

表 1 不同处理下坡面入渗特征参数统计

降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	解冻 深度/cm	累计 入渗量/mm	平均入渗率/ (mm · min ⁻¹)	初始入渗率/ (mm · min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm · min ⁻¹)
0.6	0	32.65	0.47	0.58	0.38
	2	35.94	0.47	0.58	0.34
	4	29.65	0.38	0.55	0.20
	6	43.91	0.45	0.57	0.27
0.9	0	33.90	0.52	0.86	0.39
	2	31.75	0.44	0.80	0.20
	4	37.68	0.49	0.85	0.22
	6	65.79	0.72	0.81	0.45
1.2	0	32.76	0.52	0.82	0.36
	2	30.96	0.47	0.87	0.35
	4	27.65	0.41	0.81	0.27
	6	46.28	0.63	0.89	0.40

2.3 坡面入渗过程模拟

利用已有的入渗模型 Kostiaikov 模型、Horton

模型、Philip 模型和蒋定生模型对试验结果进行模拟, 以便进一步揭示解冻期坡面的降雨入渗特征。

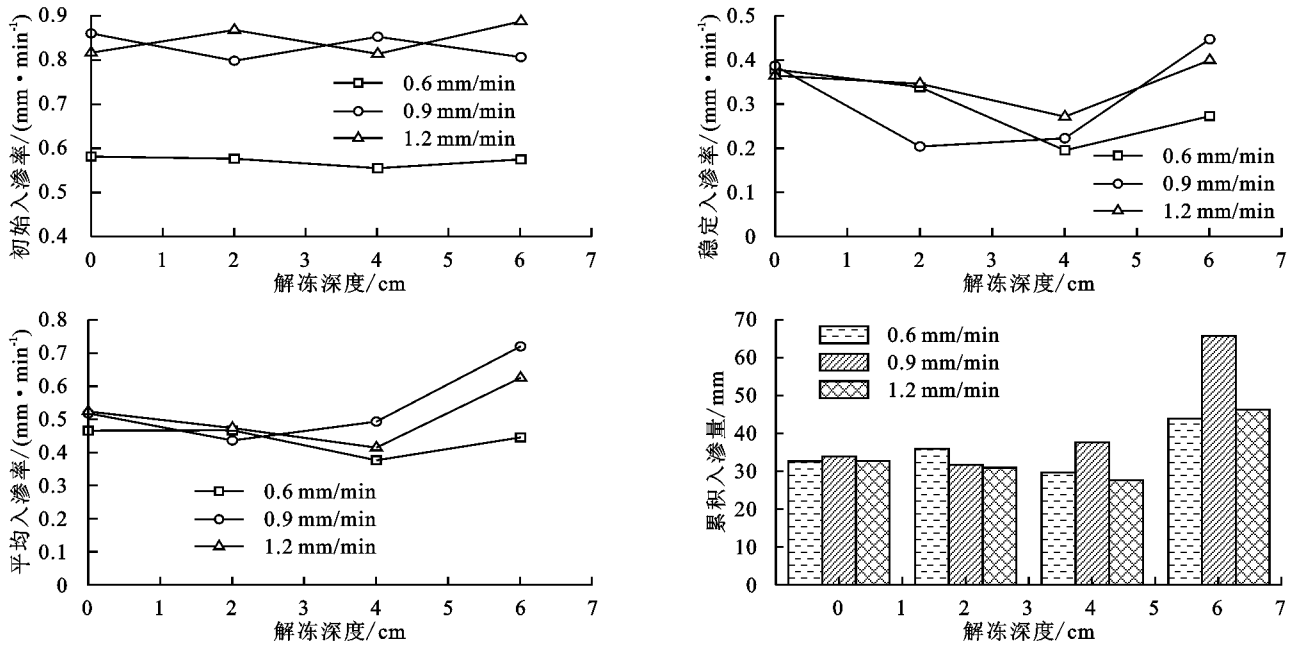


图 3 不同处理下坡面入渗特征参数

表 2 入渗特征参数与影响因子的相关性

项目	累计入渗量	平均入渗率	初始入渗率	稳定入渗率
降雨强度	0.046	0.295	0.876**	0.240
解冻深度	0.616*	0.318	-0.003	-0.106

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

2.3.1 入渗过程曲线描述 不同时间段的入渗率和入渗时间的相关关系可用幂函数 $f=at^b$ 表示。本文利用试验数据推求得到幂函数式中两个待定参数 a 、 b 值的结果见表 3。由表 3 可以看出,不同处理下入渗过程随时间变化的拟合度均较高, R^2 均大于 0.716。不同降雨强度下坡面入渗的拟合度的大小排序为 $0.6 \text{ mm/min} > 1.2 \text{ mm/min} > 0.9 \text{ mm/min}$, 在小雨强 (0.6 mm/min) 下,模型的拟合度最好。

表 3 不同处理坡面入渗曲线描述参数

降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	解冻 深度/cm	a	b	R^2
0.6	0	0.687	-0.141	0.874
	2	0.738	-0.184	0.829
	4	0.868	-0.348	0.820
	6	0.752	-0.253	0.855
0.9	0	0.924	-0.212	0.789
	2	1.188	-0.429	0.716
	4	1.420	-0.446	0.792
	6	1.082	-0.176	0.720
1.2	0	0.950	-0.240	0.716
	2	0.916	-0.267	0.806
	4	0.863	-0.303	0.808
	6	1.159	-0.278	0.858

2.3.2 4 种不同模型模拟对比 对比表 4~表 7 可

以发现,4 种模型拟合具有一定的差异,即不同处理下拟合结果的准确性不同,但共同的特点是雨强越大,拟合精度越高。另外, Kostiakov 模型拟合度范围为 0.720~0.921, Horton 模型拟合度范围为 0.830~0.974, Philip 模型拟合度范围为 0.538~0.928, 蒋定生模型拟合度范围为 0.681~0.930。通过比较分析可知, Horton 模型拟合度最好,其拟合度均达到了 0.830 以上,结果总体优于其他 3 种模型,故 Horton 模型可以作为本研究下反映解冻期坡面入渗过程的最佳模型,而根据土壤水分一维垂直运动和一定条件所获得的 Philip 模型拟合结果最差,这在一定程度上表明,具有一定物理意义的传统 Philip 模型并不适用于解冻期坡面水分入渗过程的模拟。这与刘目兴等^[24]对三峡库黏质土壤和朱冰冰等^[25]对长江中上游典型土壤以及甘凤玲等^[26]对汶川震区滑坡堆积体坡面的入渗模型适应性研究结果一致。

表 4 不同处理下坡面入渗过程的 Kostiakov 模型拟合

降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	解冻 深度/cm	f_1	a	R^2
0.6	0	0.661	0.128	0.861
	2	0.689	0.160	0.822
	4	0.711	0.275	0.833
	6	0.696	0.225	0.878
0.9	0	0.942	0.217	0.846
	2	0.930	0.334	0.792
	4	1.098	0.348	0.863
	6	1.000	0.148	0.720
1.2	0	1.049	0.271	0.806
	2	1.038	0.308	0.900
	4	1.009	0.355	0.896
	6	1.163	0.277	0.921

表5 不同处理下坡面入渗过程的 Horton 模型拟合

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	解冻 深度/cm	f_c	f_0	k	R^2
0.6	0	0.313	0.583	0.027	0.974
	2	0.214	0.582	0.021	0.949
	4	0.151	0.577	0.040	0.961
	6	0.259	0.612	0.061	0.942
0.9	0	0.425	0.985	0.141	0.876
	2	0.117	0.685	0.037	0.830
	4	0.195	0.892	0.058	0.968
	6	0.413	0.856	0.018	0.843
1.2	0	0.393	1.147	0.163	0.907
	2	0.351	1.194	0.205	0.951
	4	0.284	1.213	0.233	0.952
	6	0.406	1.124	0.116	0.939

表6 不同处理下坡面入渗过程的 Philip 模型拟合

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	解冻 深度/cm	S	A	R^2
0.6	0	0.671	0.366	0.683
	2	0.822	0.324	0.655
	4	1.208	0.166	0.726
	6	1.054	0.226	0.772
0.9	0	1.418	0.320	0.820
	2	1.733	0.137	0.744
	4	2.096	0.138	0.801
	6	1.107	0.502	0.538
1.2	0	1.762	0.257	0.822
	2	1.828	0.198	0.928
	4	1.854	0.134	0.918
	6	1.977	0.271	0.894

表7 不同处理下坡面入渗过程的蒋定生模型拟合

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	解冻 深度/cm	f_c	f_1	a	R^2
0.6	0	0.307	0.671	0.319	0.771
	2	0.068	0.689	0.067	0.807
	4	0.153	0.719	0.421	0.752
	6	0.123	0.694	0.265	0.795
0.9	0	0.140	0.954	0.285	0.846
	2	0.116	0.934	0.345	0.782
	4	0.255	1.095	0.620	0.743
	6	0.186	0.993	0.177	0.681
1.2	0	0.228	1.119	0.455	0.823
	2	0.228	1.136	0.556	0.930
	4	0.176	1.096	0.580	0.921
	6	0.052	1.163	0.302	0.920

3 结论

(1)不同初始解冻深度坡面的土壤入渗率随入渗历时的延长呈波动下降趋势,但入渗率在波动降低的过程中最终趋于一个相对稳定的入渗阶段。

(2)坡面初始入渗率受降雨强度的影响较大,0.9, 1.2 mm/min 雨强下的初始入渗率显著大于 0.6 mm/

min 下的初始入渗率,不同解冻深度下的稳定入渗率相差较小,平均入渗率与稳定入渗率随初始解冻深度的增加均呈现先减小后增大的趋势,临界解冻深度为 4 cm;解冻深度为 6 cm 时的累计入渗量显著大于解冻深度为 0,2,4 cm 的累计入渗量($p < 0.05$),且后三者之间的累计入渗量相差较小;在 0.6 mm/min 雨强下的累计入渗量随初始解冻深度的增加而增加,而在 0.9, 1.2 mm/min 雨强下呈先减小后增大的趋势,临界解冻深度分别为 2,4 cm。

(3)采用 Kostiakov、Horton、蒋定生和 Philip 4 种模型对试验结果进行模拟后发现,不同处理下各模型拟合结果的准确性不同,但共同的特点是雨强越大,拟合精度越高,Horton 模型最能反映解冻期坡面土壤入渗过程。

参考文献:

- [1] 徐学祖,王家澄.中国冻土分布及其地带性规律的初步探讨[C]//第二届全国冻土学术会议论文选集.兰州:甘肃人民出版社,1983:3-12.
- [2] 周幼吾,郭东信,程国栋,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.
- [3] 樊贵盛,郑秀清,赵生义.大田土壤冻融条件下入渗特性的试验研究[J].水土保持学报,1997,3(3):31-37.
- [4] Zheng X Q, Chen J F, Xing S Y. Infiltration capacity and parameters of freezing and thawing soil under different surface coverages[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(11):23-28.
- [5] Zheng X Q, Van Liew M W, Flerchinger G N. Experimental study of infiltration into a bean stubble field during seasonal freeze-thaw period[J]. Soil Science, 2001, 166(1):3-10.
- [6] Zheng X Q, Flerchinger G N. Infiltration into freezing and thawing soils under differing field treatments[J]. Journal and Drainage Engineering, 2001,127(3):176-182.
- [7] 薛明霞.季节性冻融土壤入渗的影响因素分析[J].山西水利科技,2007(4):57-59.
- [8] 郑秀清,樊贵盛.土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J].农业工程学报,2000,16(6):52-55.
- [9] 邢述彦.灌溉水温对冻融土壤入渗规律的影响[J].农业工程学报,2002,18(2):41-44.
- [10] 陈军锋,郑秀清,刘萍,等.不同地表条件下季节性冻融土壤入渗能力的预报模型研究[J].灌溉排水学报, 2013,32(4):35-39.
- [11] 何志萍.冻融土壤水分入渗规律的试验研究[D].太原:太原理工大学,2003.
- [12] 王飞,范昊明,郭成久,等.我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J].生态环境,2008,17(1):173-177.
- [13] 王随继.黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J].水土保持通报,2004,24(6):1-5.

参考文献:

- [1] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.长期生态学研究引领中国沙区的生态重建与恢复[J].中国科学院院刊,2017,32(7):790-797.
- [2] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013(5):397-410.
- [3] 解文艳,樊贵盛.土壤质地对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
- [4] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(1):39-47.
- [5] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [6] 吴军虎,张铁钢,赵伟,等.容重对不同有机质含量土壤水分入渗特性的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):63-67.
- [7] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [8] 赵景波,马延东,邢闪,等.腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究[J].水土保持通报,2011,31(3):12-16.
- [9] 李贵玉,胡慧方,廖建文,等.黄土丘陵区不同地类土壤入渗性能研究[J].中国水土保持,2010(12):36-40.
- [10] 王蕙,赵文智,武利玉.河西走廊荒漠区土壤物理性质沿降水梯度的变化[J].水土保持通报,2010,30(6):46-51.
- [11] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J].水土保持通报,2010,30(1):27-30.
- [12] 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.
- [13] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.喀斯特地区植被恢复过程中土壤渗透性能及其影响因素[J].中国水土保持科学,2012,10(6):12-18.
- [14] 吴楠,梁少民,王红玲,等.动物践踏干扰对生物结皮中微生物生态分布的影响[J].干旱区研究,2006,23(1):50-55.
- [15] 彭海英,童绍玉,李小雁.内蒙古典型草原土壤及其水文过程对灌丛化的响应[J].自然资源学报,2017,32(4):642-653.
- [16] Gile L H, Peterson F F, Grossmon R B. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils[J]. Soil Science, 1966, 101(5):347-360
- [17] 熊东红,翟娟,杨丹,等.元谋干热河谷冲沟集水区土壤入渗性能及其影响因素[J].水土保持学报,2011,25(6):170-175.
- [18] 郑存德,程岩,张明明.质地对土壤物理性质的影响及调节研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):174-178.
- [19] 王强.老砂田土壤容重和饱和含水率的测定[J].甘肃农业科技,2016(8):46-49.
- [20] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):33-36.
- [21] 赵景波,陈颖,曹军骥,等.青海湖西北部土壤入渗规律研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(3):90-96.
- [22] 刘洁,李贤伟,纪中华,等.元谋干热河谷3种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J].生态学报,2011,31(8):2331-2340.
- [23] 刘凯,王磊,宋乃平,等.毛乌素沙地南缘不同林龄人工柠条林土壤渗透性研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):89-94.
- [24] 李柏.不同荒漠生态系统生物结皮分布及水文特征研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [25] 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.
- [14] 刘国彬.黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J].水土保持学报,1998,4(1):93-96.
- [15] 中国科学院林业土壤研究所.中国东北土壤[M].北京:科学出版社,1980:193-349.
- [16] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等.土的冻结作用与地基[M].北京:科学出版社,2006:132.
- [17] 魏霞,李勋贵,Huang C H,等.交替冻融对坡面产流产沙的影响[J].农业工程学报,2015,31(13):157-163.
- [18] 周丽丽,王铁良,范昊明,等.未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):1-4.
- [19] Sharratt B S, Lindstrom M J. Laboratory simulation of erosion from a partially frozen soils [C]//Ascough J C, Flanagan D C. Soil Erosion Research for the 21st Century. St. Joseph, MI: ASAE, 2001:159-162.
- [20] 刘彦辰,王瑄,周丽丽,等.冻融坡面土壤剥蚀率与侵蚀因子关系分析[J].农业工程学报,2016,32(8):136-141.
- [21] 范昊明,郭萍,武敏,等.春季解冻期白浆土融雪侵蚀模拟研究[J].水土保持通报,2011,31(6):130-133.
- [22] 周丽丽,范昊明,武敏,等.白浆土春季解冻期降雨侵蚀模拟[J].土壤学报,2010,47(3):574-578.
- [23] Ban Y, Lei T, Chen C, et al. Study on the facilities and procedures for meltwater erosion of thawed soil [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2016, 4(2):142-147.
- [24] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,24(3):871-878.
- [25] 朱冰冰,张平仓,丁文峰,等.长江中上游地区土壤入渗规律研究[J].水土保持通报,2008,28(4):43-47.
- [26] 甘凤玲,何丙辉,王涛.汶川震区滑坡堆积体坡面人工降雨入渗模拟研究[J].水土保持学报,2015,29(6):19-24.

(上接第17页)