

紫色土坡耕地土质埂坎分层入渗试验研究

黎娟娟¹, 韦杰^{1,2}, 李进林¹, 史炳林¹, 洪兰¹

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要:以相邻田面为对照,利用双环入渗法对三峡库区紫色土坡耕地土质埂坎分层(地埂、坎腰和坎趾)的入渗特征进行研究。结果表明:(1)土质埂坎分层入渗与对照田面入渗均呈先陡降后趋于稳定的趋势,但达到稳定入渗的时间存在差异。地埂达到稳定入渗的时间最长(110 min),坎腰、坎趾和田面达稳定入渗的时间分别比地埂少9%,82%,18%。从入渗性能看,土质埂坎各层均表现出初始入渗率>平均入渗率>稳定入渗率。平均入渗率与120 min累积入渗量表现为地埂>坎腰>田面>坎趾,初始入渗率为坎腰>地埂>田面>坎趾,稳定入渗率为田面>坎腰>地埂>坎趾。(2)采用4种模型进行拟合,其中通用经验模型是描述坡耕地土质埂坎入渗的较好模型,其后依次是Kostiakov模型、Horton模型和Philip模型。(3)土质埂坎入渗性能与土壤物理性质具有较好的相关性,初始入渗率与初始含水率、容重呈显著负相关($P<0.05$),平均入渗率、120 min累积入渗量与粉粒体体积分数、初始含水率呈显著负相关($P<0.05$),与砂粒体积分和总孔隙度呈显著正相关($P<0.05$)。研究结果可为紫色土区坡耕地土壤侵蚀调控的埂坎措施优化提供依据。

关键词:土质埂坎; 分层入渗; 模型模拟; 坡耕地; 紫色土

中图分类号:S157.3⁺2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2017)04-0069-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.04.012

Experimental Study of Different Layers Infiltration of Soil Bunds on Purple-soil Sloping Farmlands

LI Juanjuan¹, WEI Jie^{1,2}, LI Jinlin¹, SHI Binglin¹, HONG Lan¹

(1. College of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331)

Abstract: An adjacent field was chose as a reference and soil infiltration rates of layered soil bunds (the upper, the central and the lower) were determined using double rings on the purple-soil sloping farmland. The results showed that: (1) The infiltration processes of all layered soil bunds and the field dropped steeply then decreased slowly till stable. However, there were differences on the duration to the stable infiltration. It cost a relatively longer time (110 minutes) for the upper bund to the stable state. The time for the central, the lower bund and the field was 9%, 82%, and 18% shorter than that of the upper bund. In perspective of infiltration performance, the soil permeability was sequenced as the initial infiltration rate, the mean infiltration rate, and then the steady infiltration rate. In view of layered soil bunds, the mean infiltration rate and the 120 minutes cumulative infiltration was sorted as the upper bund, the central bund, the field, and the lower bund. The initial infiltration rate was sequenced as the central bund, the upper bund, the field, and the lower bund, while the steady infiltration rate was sorted as the field, the central bund, the upper bund, and the lower bund. (2) Four models had been used to simulate the soil bund infiltrations. Among them, the general experience model was considered as the optimum one, and it was followed by the Kostiakov model, the Horton model and the Philip model. (3) The permeability of soil bunds had close relation with soil physical properties. The initial infiltration rate was significantly negative related to the initial water content and soil bulk density ($P<0.05$). The mean infiltration rate and the 120 minutes cumulative infiltration was significantly negative correlated with the silty particles volume and the initial water content ($P<0.05$), and significantly positive correlated with the sandy particles volume and the total porosity ($P<0.05$). The results of this study can provide a foundation for bunds construction as to control soil erosion on purple-soil farmlands.

Keywords: soil bunds; layered infiltration; model simulation; sloping farmland; purple soil

收稿日期:2017-03-02

资助项目:国家自然科学基金项目(41471234);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjBX0141);重庆市教委科技项目(KJ1500315)

第一作者:黎娟娟(1992—),女,四川内江人,硕士研究生,主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail:lijuanjuan314@163.com

通信作者:韦杰(1979—),男,四川苍溪人,博士,教授,硕士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wei_jie@mails.ucas.ac.cn

入渗是降雨或灌溉水再分配的重要过程,也是评价土壤水分调节和水源涵养作用的重要指标^[1]。土壤入渗研究对地表径流、土壤侵蚀和面源污染调控以及生态环境建设等具有重要意义^[1-2]。目前,关于土地利用方式、土壤类型和土壤剖面结构等方面对土壤入渗的影响研究报道较多^[1-6]。不同土地利用方式的下垫面糙度差异较大,土壤的渗润、渗漏、渗透等入渗过程阶段明显。通常认为,初始入渗率和稳定入渗率等指标表现为林地>草地>耕地^[3],但熊东红等^[4]认为初始入渗率和稳定入渗率均体现为林地>耕地>草地。不同土壤类型的土壤理化性质差异显著,从而造成土壤入渗性能的差异,如朱冰冰等^[5]研究长江中上游典型土壤后发现黄壤的稳定入渗率最大,其次是石灰土和紫色土,红壤最小。土壤剖面的人渗性能也存在一定变异性,如刘目兴等^[6]研究发现山地棕壤和山地黄棕壤的入渗能力随土层深度增加而增大,即腐殖质层<淋溶淀积层<母质层,而山地黄壤则呈相反趋势。

土质埂坎是三峡库区紫色土坡耕地重要的水土保持措施,约占坡耕地面积的 10%~15%^[7]。研究表明,埂坎稳定性与土壤含水率关系密切,埂坎抗剪强度随含水率的增加而降低,当含水率达到一定程度时,其抗剪强度趋于低值^[7]。目前,关于埂坎的研究多集中于埂坎的利用、抗剪稳定以及生物埂的构建等^[8-10]方面,而关于埂坎入渗的研究较少,埂坎各部分入渗的规律不清楚,不利于埂坎建设和维护实践。本文以紫色土坡耕地土质埂坎为研究对象,采用双环入渗法进行土质埂坎分层入渗试验并模拟其入渗过程,以期对紫色土区坡耕地土壤侵蚀调控的埂坎措施优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选择在三峡库区长江干流北岸的桐坪小流域,位于重庆市万州区甘宁镇桐坪村(30°40'—30°42'N, 108°16'—108°18'E)。该流域属于亚热带湿润季风气候,日照充足,雨量充沛,多年平均气温 17.7℃,日照时数 1 204.5 h,降水量 1 293.3 mm,无霜期 260~283 d,70%

以上降水集中在每年的 5—9 月。地层为中生代侏罗系沙溪庙组 and 自流井组岩层。土壤类型主要为紫色土和水稻土,>25°的旱坡耕地占 30%左右。常见作物有水稻(*Oryza Sativa*)、玉米(*Zea mays*)、红薯(*Ipomoea batatas*)、油菜(*Brassica campestris*)等。小流域内未实施过水土保持工程,所有耕地埂坎均为土质埂坎,且结构完整。流域内土质埂坎高 0.5~2.2 m,坎面坡度约 50°~70°,埂坎外边坡长有牛筋草(*Eleusine indica*)、马唐草(*Digitaria sanguinalis*)、狗尾巴草(*Setaria viridis*)等杂草,盖度为 90%左右。地埂内侧高 10~20 cm,顶宽 25~35 cm。

1.2 试验设计

多次踏勘后,于 2016 年 7—8 月在试验地选取了一条完整的典型土质埂坎进行试验,并以相邻上田面(采样时玉米已收获)为对照。样坎高约 1 m,地埂顶宽约 0.3 m,地埂内侧高约 0.15 m,具有较好代表性。试验前在确保土壤结构受损最小的情况下清除表面杂草。为了方便研究,将土质埂坎划分为地埂、坎腰和坎趾 3 层(图 1),并在坎腰和坎趾开挖合适的试验平面,在埂坎各层及田面分别进行双环入渗试验。试验时为了减少上层对下层入渗的影响,地埂、坎腰和坎趾分别错开一定水平距离,每次入渗试验均持续 4 h 左右。试验完成后,对埂坎进行修复。每个样点采集 3 个重复土样带回实验室进行物理性质测定,结果见表 1。采用环刀法测定土壤容重和总孔隙度,烘干法测定土壤初始含水率(质量百分比),马尔文 MS 2000 激光粒度分析仪测定土壤颗粒组成。

采用土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率及前 120 min 累积入渗量 4 个指标来描述土壤入渗性能。初始入渗率是开始入渗时段内单位时间的入渗量,参考他人研究^[1],本文取前 3 min 的入渗率表示。平均入渗率是到达稳定入渗时的入渗总量与到达稳定入渗的时间的比值。稳定入渗率为单位时间内的入渗量趋于稳定时(即内环水头趋于稳定)的入渗率。

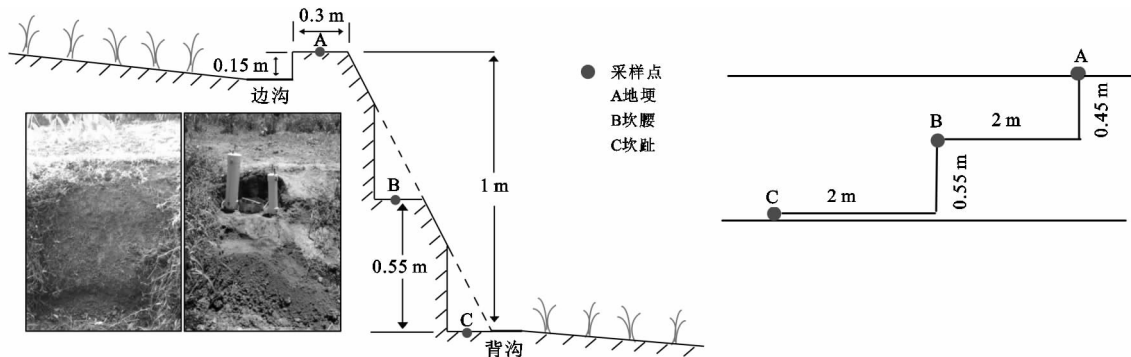


图 1 样坎入渗试验示意

表 1 样坎土壤物理性质

样点	土壤颗粒组成/%			初始	容重/	总孔隙度/
	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(>0.05~2 mm)	含水率/%	(g·cm ⁻³)	%
地埂	5.14±0.48	67.22±9.04	27.64±9.69	11.84±0.62	1.40±0.02	47.82±0.07
坎腰	5.44±0.45	69.06±9.84	25.50±8.34	13.29±0.96	1.39±0.10	45.44±0.07
坎趾	5.75±1.16	70.70±6.08	23.56±6.45	22.00±1.09	1.49±0.08	41.63±0.14
田面	5.19±0.48	70.11±4.72	24.70±5.02	20.76±0.79	1.45±0.07	43.89±0.10

注:表中数据为均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 土质埂坎分层入渗特征

土质埂坎各层的入渗过程存在一定相似性(图 2),即入渗率在开始阶段陡降,20 min 下降幅度为 12%~82%,随时间推移,下降速率逐渐减小,最后趋于稳定,从入渗开始到埂坎各层趋于稳定的下降幅度为 81%~84%。地埂达到稳定入渗的时间最长(110 min),坎腰(100 min)、坎趾(20 min)和田面(90 min)达稳定入渗的时间分别比地埂少 9%,82%,18%。相同时间内,最大入渗率(地埂)与最小入渗率(坎趾)间的入渗差值随时间递减,入渗率差值最大为 30.25 mm/min。可以认为,地埂初始入渗较快且入渗水量较大,是由于地埂表层杂草丛生、根孔虫孔较多、土壤孔隙度大的缘故^[11]。同时,地埂地势高,初始含水率小于其他分层。

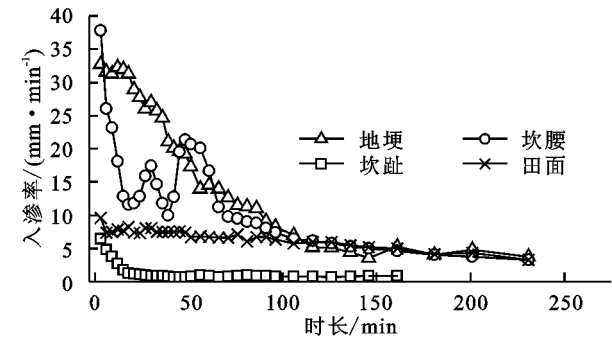


图 2 土质埂坎分层入渗过程

土质埂坎各层入渗率存在较大差异(表 2)。土质埂坎各层均表现为初始入渗率>平均入渗率>稳定入渗率,这与李建兴等^[12]的研究结果相似。平均入渗率与 120 min 累积入渗量变化趋势一致,均为地埂>坎腰>田面>坎趾,初始入渗率表现为坎腰>地埂>田面>坎趾,稳定入渗率为田面>坎腰>地埂>坎趾。这是因为地埂杂草丛生,众多根系穿插能增加土壤孔隙,减小土壤容重,增强土壤入渗性能^[11]。而坎趾临近田面背沟,背沟及附近土壤含水率相对较高,影响坎趾初始含水率也较高。同时,坎趾下存在隔水层阻挡了水分入渗,因此坎趾入渗能力相对较弱。此外,坎趾黏粒和粉粒体积分数较大、砂粒体积分数较小,土壤较为密实、孔隙度小,入渗性能则较弱^[13]。坎腰的初始入渗率比地埂的相对较大,可能是因为虽然坎腰与地埂的土壤物理性质较为接近,但是地埂作为道路行走受

人为踩踏影响,土壤整体较为密实,而坎腰土壤相对疏松,因此坎腰的初始入渗率相对地埂较大。

表 2 土质埂坎分层入渗性能指标

样点	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	120 min 累积 入渗量/mm
地埂	32.71	18.36	4.39	1668
坎腰	37.77	14.53	4.50	1232
坎趾	6.40	3.11	0.81	117
田面	9.59	7.25	4.75	606

土质埂坎各层 120 min 累积入渗量见图 3。埂坎各层间的累积入渗量均随时间延长而增加,但增加速率具有显著性差异($P<0.05$)。地埂和坎腰的 120 min 累积入渗量均大于田面,而坎趾的 120 min 累积入渗量小于田面,埂坎各层相比较则为地埂(1 668 mm)>坎腰(1 232 mm)>坎趾(117 mm),其中地埂 120 min 的累积入渗量分别是坎腰、坎趾的 1.35 倍和 14.25 倍。地埂在初始阶段(0~20 min)的累积入渗量曲线斜率最大,分别比坎腰、坎趾和田面在初始阶段(0~20 min)的累积入渗量曲线斜率大 46%,75%,92%,这是因为在同一入渗时间内,累积入渗量随初始含水率的减小而增大^[14]。

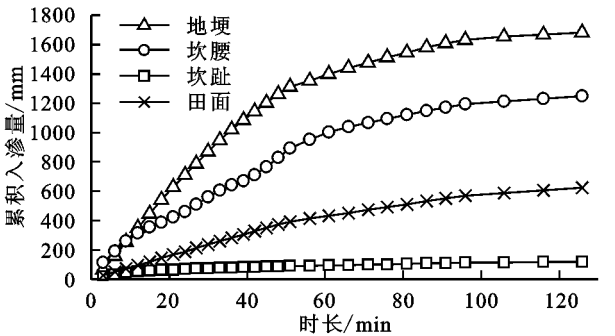


图 3 土质埂坎分层 120 min 累积入渗量

2.2 土质埂坎分层入渗过程模拟

采用 Kostikov 模型^[15]、Horton 模型^[16]、Philip 模型^[17]和通用经验模型^[18]对埂坎各层的入渗过程进行模拟,结果见表 3。Kostikov 模型拟合的 a 值表征初始入渗率,主要受土壤结构和初始含水率影响,土壤孔隙越大,初始含水率越小, a 值越大,反之,土壤孔隙越小,初始含水率越大, a 值越小。 b 值表示入渗率随时间减少的程度, b 值越大,入渗率随时间减少越快。拟合结果 a 值在 2.94~127.25 之间,且表现为地埂>坎腰>坎趾>田面,这与实测初始入渗率

值趋势基本一致。 b 值表现为地埂>坎趾>坎腰>田面,与实测值有偏差。Horton 模型中 k 值反映了入渗率的减小状况, k 值越大,入渗率随时间减小越快。拟合的 k 值在 0.04~0.18 之间,表现为田面>地埂>坎趾>坎腰,这与实测值相反,实测值是坎腰入渗率随时间减小更快,田面入渗率减小较慢。Philip 模型中的 A 值为实测的稳定入渗率, b 值表征初始入渗率,拟合结果为坎腰>地埂>坎趾>田面,可以基本反映埂坎各层间入渗的差异。通用经验模型中的 a 、 b 值分别表征稳定入渗率和初始入渗率,从拟合结果看, a 值为田面>坎腰>地埂>坎趾,与实测趋势一致且拟合值与实测值仅相差 0.49~2.45,符合实测稳定入渗率; b 值拟合结果与实测值基本趋势相同,表现为地埂>坎腰>坎趾>田面。

不同模型对埂坎各层的入渗过程拟合优度用判

定系数 R^2 表示, R^2 越大,拟合效果越好。从表 3 可以看出,地埂采用 Kostiakov 模型的 R^2 为 0.85,坎腰和田面采用通用经验模型的 R^2 分别为 0.82,0.90,通过拟合优度检验,拟合效果较好。坎趾采用 Kostiakov 模型和通用经验模型的拟合效果均适宜,其 R^2 均为 0.93。Horton 模型和 Philip 模型对埂坎各层的入渗过程拟合效果较差, R^2 最小仅 0.45。虽然 Kostiakov 模型对埂坎各层的入渗过程拟合效果较好,但 $t \rightarrow 0$ 时 $f(t) \rightarrow \infty$, $t \rightarrow \infty$ 时 $f(t) \rightarrow 0$,与实际不符。综合考虑,通用经验模型对土质埂坎各层入渗过程的拟合效果较好,其判定系数 R^2 为 0.81~0.93,其次是 Kostiakov 模型、Horton 模型和 Philip 模型。表明通用经验模型是描述土质埂坎入渗过程的较好模型,这与刘芝芹等^[3]对金沙江干热河谷、李建兴等^[12]对紫色土坡耕地不同种植模式的土壤入渗模型适宜性评价结果相似。

表 3 土质埂坎分层入渗模拟方程

样点	Kostiakov 模型		Horton 模型		Philip 模型		通用经验模型	
	$f(t)=at^{-b}$	R^2	$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$	R^2	$f(t)=A+bt^{-0.5}$	R^2	$f(t)=a+bt^{-n}$	R^2
地埂	$f(t)=127.25t^{1.44}$	0.85	$f(t)=4.39+28.32e^{-0.17t}$	0.66	$f(t)=4.39+30.22t^{-0.5}$	0.51	$f(t)=3.01+172.38t^{-1.87}$	0.81
坎腰	$f(t)=55.26t^{0.40}$	0.71	$f(t)=4.50+33.27e^{-0.04t}$	0.45	$f(t)=4.50+52.24t^{-0.5}$	0.69	$f(t)=-6.95+58.98t^{0.22}$	0.82
坎趾	$f(t)=14.89t^{0.73}$	0.93	$f(t)=0.81+5.59e^{-0.09t}$	0.92	$f(t)=0.81+5.20t^{-0.5}$	0.52	$f(t)=0.32+16.83t^{0.86}$	0.93
田面	$f(t)=2.94t^{0.29}$	0.87	$f(t)=4.75+4.84e^{-0.18t}$	0.82	$f(t)=4.75+4.69t^{-0.5}$	0.64	$f(t)=17.16-7.90t^{-0.16}$	0.90

注: $f(t)$ 为入渗率; t 为入渗时间; f_c 为稳定入渗率; f_0 为初始入渗率; k 为常数; A 为稳定入渗率; a 、 b 、 n 为拟合参数。

2.3 土质埂坎入渗性能与土壤物理性质的关系

从土质埂坎入渗性能与土壤物理性质的相关性来看(表 4),除黏粒体积分数外,粉粒和砂粒体积分数、容重、初始含水率和总孔隙度对初始入渗率、平均入渗率和 120 min 累积入渗量影响较大。

土壤颗粒组成中,粉粒体积分数与平均入渗率、120 min 累积入渗量呈负相关。砂粒体积分数与平均入渗率、120 min 累积入渗量呈正相关,而黏粒体积分数与各入渗指标相关性均较小。研究表明,砂粒体积分数越大,黏粒体积分数越小,土壤结构越疏松,入渗性能越强^[4]。由表 1、表 2 可知,埂坎各层砂粒体积分数表现为地埂>坎腰>田面>坎趾,黏粒体积分数与之相反,地埂的平均入渗率、稳定入渗率和 120 min 累积入渗量均大于其他埂坎各层,这与上述结论十分相似。此外,土壤粉粒具有较强的吸附水能力,本研究中土质埂坎各层粉粒体积分数约 70%,粉粒吸水膨胀导致孔隙收缩使入渗率减小^[19],黏粒体积分数较低(5.14%~5.75%),对入渗影响相对较弱。

表 4 土质埂坎入渗性能与土壤物理性质的相关系数

土壤入渗 指标	土壤颗粒组成/%			初始 含水率/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/ %
	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.05 mm)	砂粒(>0.05~2 mm)			
初始入渗率	-0.38	-0.80	0.77	-0.97*	-0.96*	0.83
平均入渗率	-0.65	-0.96*	0.95*	-0.98*	-0.94	0.98*
稳定入渗率	-0.88	-0.56	0.64	-0.59	-0.78	0.74
120 min 累积入渗量	-0.70	-0.96*	0.96*	-0.97*	-0.94	0.99*

注:* 表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

入参与土地利用方式密切相关,不同土地利用方式的地表糙度、植物根系和土壤理化性质等存在差异,导致土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率等入渗指标在空间分布上也存在差异。不同土地利用方式土壤入渗性能的相关研究结果见表 5。裸地、坡耕地、林地和水源涵养林的土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率等入渗指标均随土壤深度的增加而递减^[1,11-12,23],这与本研究中土质埂坎各层的相应入渗指标随土壤深度的增加而递减的研究结果一致。但刘目兴等^[6]认为林地山地棕壤和黄棕壤的初始入渗率和稳定入渗率均随土壤深度的增加呈递增趋势,这可能是由于影响土壤各层入渗性能的主要因子不同。此外,生物埂护坡下的不同土地利用类型的土壤入渗性能均优于无生物埂的坡耕地,说明生物埂能增加土壤入渗,延缓地表产流^[23],而本研究结果表明自然状态下的地埂入渗较大反而不利于地埂保持

稳定。原因可能在于生物埂上较多种植根系粗壮、侧根发达的小乔木、灌木和草本,它们发达的根系相互盘结,改变了土壤容重和孔隙度等土壤结构,加上植被的根系分泌物及枯枝落叶腐烂分解对土壤产生生物化学作用,使土壤颗粒团聚,结构更紧密,而本研究中的地埂面的杂草,根系浅而少,仅增加了水分入渗,并没起到明显固结土壤的作用,反而减小地埂抗剪强度,降低其稳定性。

需要说明的是,水分入渗过程十分复杂,影响因素众多。本文采用双环法进行试验,试验中,在内环及内、外环之间的环形空间同时注水并保持水层处于同一高度,这样内外环之间的水主要消耗在侧向扩散上,确保了内环的水主要消耗在垂向渗透上,为准垂向一维渗流^[13]。虽然这与实际情况有所差异,但本研究主要在于揭示埂坎分层垂直入渗的差异。在后续研究中,将进一步采取不同试验方法研究埂坎的垂直入渗和侧向入渗及其影响机制。

表 5 不同土地利用方式对入渗性能的作用

土样来源	土壤类型	土壤深度	入渗指标/(mm·min ⁻¹)			模型		来源
			初始入渗率	稳定入渗率	平均入渗率	拟合方程	R ²	
林地	黄壤	0—10	15.50	4.03	7.33	$f(t)=31.07t^{-0.53}$	0.98	赵洋毅等 ^[1]
		10—20	13.20	2.90	5.50	$f(t)=12.28t^{-0.36}$	0.96	
		20—30	7.01	2.34	4.20	$f(t)=21.82t^{-0.40}$	0.98	
		30—40	0.23	0.21	0.32	$f(t)=7.35t^{-0.02}$	0.65	
林地	棕壤	0—10	0.94	0.13	—	$f(t)=0.13+0.88e^{0.06t}$	0.99	刘目兴等 ^[6]
		10—40	44.59	13.54	—	$f(t)=13.54+25.31e^{-0.06t}$	0.94	
		40—70	60.19	20.22	—	$f(t)=20.22+37.44e^{0.09t}$	0.94	
裸地	紫色土	0—10	2.01	1.00	1.28	$f(t)=2.06t^{0.58}$	0.71	李建兴等 ^[11]
		10—20	1.13	0.53	0.89	$f(t)=1.62t^{0.49}$	0.67	
		20—30	0.75	0.47	0.67	$f(t)=0.47t^{0.51}$	0.75	
裸地	紫色土	0—10	1.23	0.89	0.36	$f(t)=0.36+1.06t^{-0.26}$	0.97	李建兴等 ^[12]
		10—20	1.23	0.57	0.23	$f(t)=-0.07+1.37t^{-0.27}$	0.99	
		20—30	0.21	0.23	0.15	$f(t)=0.28+0.37t^{-1.46}$	0.95	
林地		0—10	6.25	2.73	3.38	$f(t)=-53.35+60.33t^{-0.02}$	0.96	李建兴等 ^[23]
		10—20	3.78	1.21	1.37	$f(t)=-0.45+4.81t^{-0.22}$	0.99	
		20—30	2.15	1.02	1.15	$f(t)=-21.13+23.60t^{-0.01}$	0.96	
		0—15	28.00	2.00	4.50	$f(t)=0.10+28.35t^{-0.66}$	0.99	
坡耕地(有埂)	紫色土	15—30	6.31	0.97	2.53	$f(t)=-99.75+106.61t^{-0.01}$	0.93	莫斌等 ^[24]
坡耕地(无埂)	紫色土	0—15	29.00	1.50	4.15	$f(t)=0.64+28.16t^{-0.81}$	0.99	
		15—30	5.20	0.55	1.64	$f(t)=-85.48+91.43t^{-0.01}$	0.94	
		0—20	8.46	0.33	1.16	$f(t)=9.34t^{-0.73}$	0.98	
坡耕地	紫色土	0—10	7.80	1.87	0.05	—	—	马晓刚等 ^[25]
	紫色土	0—10	2.25	1.05	1.43	—	—	蒋光毅等 ^[26]
坡耕地(桑埂)	紫色土	10—20	8.88	6.75	7.14	—	—	王伟等 ^[27]
		20—30	1.68	1.16	1.39	—	—	
		30—40	0.65	0.38	0.51	—	—	
		0—10	25.35	3.97	5.48	$f(t)=1.97+36.00e^{-0.04t}$	0.93	
人工林荒地	黄(棕)壤		11.36	3.03	4.00	$f(t)=2.33+19.38e^{-0.02t}$	0.97	本研究
坡耕地埂坎	紫色土	0—10	32.71	4.39	18.36	$f(t)=3.01+172.38t^{-1.87}$	0.81	
		40—50	37.77	4.50	14.53	$f(t)=-6.95+58.98t^{-0.22}$	0.82	
		80—90	6.40	0.81	3.11	$f(t)=0.32+16.83t^{-0.86}$	0.93	

注:表中“—”表示无数据。

4 结论

(1) 土质埂坎各层入渗均呈先陡降后趋于稳定的规律, 但地埂达稳定入渗的时间最长(110 min), 坎腰、坎趾和田面达稳定入渗的时间分别比地埂少 9%, 82%, 18%。土质埂坎入渗性能均为初始入渗率 > 平均入渗率 > 稳定入渗率。平均入渗率与 120 min 累积入渗量变化趋势一致, 均为地埂 > 坎腰 > 田面 > 坎趾, 初始入渗率为坎腰 > 地埂 > 田面 > 坎趾, 稳定入渗率为田面 > 坎腰 > 地埂 > 坎趾。

(2) 通用经验模型是描述土质埂坎入渗的较好模型, 然后依次是 Kostiakov 模型、Horton 模型和 Philip 模型。

(3) 土质埂坎入渗性能与土壤物理性质具有较好的相关性, 初始入渗率与初始含水率、容重呈显著负相关($P < 0.05$), 平均入渗率、120 min 累积入渗量与粉粒体积分数、初始含水率呈显著负相关($P < 0.05$), 与砂粒体积分数和总孔隙度呈显著正相关($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 等. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [2] 黄俊, 吴普特, 赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 29-37.
- [3] 刘芝芹, 黄新会, 王克勤. 金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 57-62.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 刘目兴, 杜文正, 张海林. 三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 299-306.
- [7] 韦杰, 史炳林, 李进林. 紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 153-160.
- [8] Vancampenhout K, Nyssen J, Gebremichael D, et al. Stone bunds for soil conservation in the northern Ethiopian highlands: Impacts on soil fertility and crop yield[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(1/2): 1-15.
- [9] Janssen M, Lennartz B. Water losses through paddy bunds: Methods, experimental data, and simulation studies[J]. Journal of Hydrology, 2009, 369(1/2): 142-153.
- [10] Miolo R N, Visco R G, Magcale-Macandog D B, et al. Growth performance, crop productivity, and water and nutrient flows in Gmelina arborea Roxb. - Zea mays hedgerow systems in Southern Philippines[J]. Crop Protection Newsletter, 2011, 36(3): 34-44.
- [11] 李建兴, 何丙辉, 湛芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [12] 李建兴, 何丙辉, 梅雪梅, 等. 紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 725-731.
- [13] 郭彩华. 汾河南内环桥—南中环桥河道土壤稳定入渗率变化规律的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2008, 39(2): 171-173.
- [14] 李发文, 费良军. 膜孔多向交汇入渗特性及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 105-109.
- [15] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of a melioration[J]. Soil Science, 1932, 97(1): 17-21.
- [16] Horton R E. An Approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5(C): 399-417.
- [17] Philip, J R. The theory of infiltration; 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Science, 1957, 84(3): 257-264.
- [18] Voller V R. On a fractional derivative form of the Green-Ampt infiltration model[J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(2): 257-262.
- [19] 余蔚青, 王玉杰, 胡海波, 等. 长三角丘陵地不同植被林下土壤入渗特征分析[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 345-351.
- [20] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878.
- [21] Liu H, Lei T W, Zhao J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1/2): 24-32.
- [22] 石辉, 王峰, 李秧秧. 黄土丘陵区人工油松林地土壤大孔隙定量研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 28-32.
- [23] 李建兴, 何丙辉, 徐小军. 生物埂护坡下不同土地利用方式对土壤渗透性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 243-248.
- [24] 莫斌, 陈晓燕, 杨以翠, 等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 13-17.
- [25] 马晓刚, 张兵, 史东梅, 等. 丘陵区不同土地利用类型紫色土入渗特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 25-29.
- [26] 蒋光毅, 黄先智, 史东梅, 等. 石漠化区桑树地埂的土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 215-221.
- [27] 王伟, 张洪江, 杜士才, 等. 重庆市四面山人工林土壤持水与入渗特性[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 113-117.