

黄土区不同生长期大豆坡耕地的入渗特征

王林华¹, 马波², 吴发启^{3†}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌;
3. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100, 陕西杨凌)

摘要: 坡耕地水土流失是土壤侵蚀最为突出的问题。为了研究坡耕地在作物不同生长期内降水土壤水分入渗性能, 选取大豆 (*Glycine max* L.) 的初花期 (R_1)、末花期 (R_2)、结荚期 (R_4)、始粒期 (R_5) 的坡耕地为研究对象, 并以裸坡为对照 (CK), 通过人工模拟降雨实验方法, 分析其入渗过程及特征, 并用 Horton 和 Kostikov 入渗模型对入渗过程模拟。结果表明: 不同降雨强度和坡度条件下, 大豆各生长期的坡地与裸坡的初始入渗率、稳定入渗率、累计入渗量和入渗补给系数总体呈现出 $R_5 > R_4 > R_2 > R_1 > CK$ 的变化趋势; 采用的 Horton 和 Kostikov 2 个入渗模型拟合效果较好, 且能反映大豆坡耕地在不同生长期的降水入渗过程及其特征, 二者的拟合优度都比较高, 其中 Horton 模型的拟合效果优于 Kostikov 模型。

关键词: 生长期; 入渗特征; 坡耕地; 黄土高原

中图分类号: S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3007(2015)04-0015-10

Infiltration characteristics in sloping farmland at different growth stages of soybean (*Glycine max* L.) in loess area

Wang Linhua¹, Ma Bo², Wu Faqi³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China;
3. College of Resources and Environments, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

Abstract: Soil erosion in sloping farmland is a key ecological and environmental issue that threatens the sustainable agricultural development on the Loess Plateau of China. Knowledge of infiltration process is crucial for understanding and managing hydrological processes and soil erosion in sloping farmland. The objective of this study was to clarify the infiltration characteristics in sloping farmland at different stages of crop growth. The soybean (*Glycine max* L.) was selected as our research object and its growth was divided into four stages: initial flowering stage (R_1), late flowering stage (R_2), pod bearing stage (R_4), and maturity starting stage (R_5). The bare sloping farmland was set as control (CK). Runoff from experimental plots was collected under the simulated rainfall condition, the infiltration processes and characteristics were analyzed, and the infiltration processes were simulated with the Horton and Kostikov infiltration models. The following results were obtained. For the four growth stages of soybean, parameters such as initial infiltration rate, stable infiltration rate, cumulative infiltration amount and infiltration recharge coefficient presented generally the order as $R_5 > R_4 > R_2 > R_1 > CK$ at different rainfall intensities and slope gradients. The recharge coefficient increased with growth stages but

收稿日期: 2014-10-13 修回日期: 2015-04-07

项目名称: 国家自然科学基金“黄土坡耕地地表糙度对产汇流的影响研究”(41271288); 国家自然科学基金青年基金“秸秆覆盖对坡耕地细沟侵蚀过程阻控机制研究”(41401309)

第一作者简介: 王林华(1987—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀过程。E-mail: wlhsoilwater@nwsuaf.edu.cn

† 通信作者简介: 吴发启(1957—), 男, 博士, 教授。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wufaqi@263.net

decreased with slope gradient. The crop coverage was the important factor for determining the recharge coefficient. Simulated infiltration processes with Horton and Kostiakov models showed that two models fit well with the infiltration and could reflect the infiltration characteristics while the fitting effect of Horton was better than Kostiakov. The results of our study are helpful for better understanding of the infiltration processes and characteristics in sloping farmland during the crop growth stages.

Keywords: growth stages; infiltration characteristics; sloping farmland; Loess Plateau

黄土高原地区是我国坡耕地的主要分布区之一,其面积占到总耕地面积的 50% 左右,在水土流失严重的黄土丘陵区可达到 70% ~ 90%; 因此,坡耕地是该区水土流失的主要策源地。一般情况下,其土壤侵蚀量占总侵蚀量的 50% ~ 60%^[1-2]。综观其流失特征可知,在其他条件一致的情况下,土壤入渗量的大小是影响侵蚀强弱变化的主要因素之一,因为在坡耕地水土流失过程中,入渗是降水进入土壤的过程,产流是降水转化为径流的过程^[3-5]; 而坡耕地的入渗性能决定了降水过程中径流的产生与量的多寡。为此,坡耕地降水入渗特征研究受到了普遍重视。

众多研究成果表明土壤水分入渗过程受到土壤初始含水量、土壤质地、土壤结构、坡度和降雨强度等因素的影响^[6-13]。当坡耕地上栽培作物等植被时,随着生长季节的变化,这一过程会变得更加复杂。坡耕地作为水土流失主要来源的特殊侵蚀单元,体现在坡耕地上的农作物较天然林、草、灌等植被相比有明显的差异,如农作物生长期更迭导致坡面作物覆盖度不同、空间覆被结构单一(不存在枯枝落叶层、根系差异),以及人为耕作活动等。这些差异性特征导致了农地的侵蚀强度、泥沙运输能力等是草地的 5.7 倍,是林地的 27.5 倍^[14-16]。在坡耕地入渗方面,K. P. Barley 等^[17]研究表明坡耕地在玉米(*Zea mays* L.) 根系分解后的入渗能力相比裸地有所提高。T. J. Gish 等^[18]和 B. D. Meek 等^[19]分别通过分析小麦(*Triticum aestivum* L.) 和苜蓿(*Medicago sativa* L.) 作用后也得出类似于 K. P. Barley 等^[17]的结论。目前多采用双环实验、人工模拟降雨实验对林地、草地等植被覆盖条件下土壤入渗能力的变化^[20-23]进行研究,一方面农作物也是黄土高原地区植被覆盖种类之一且面积较大,另一方面由于农业耕作的季节性致使坡耕地的水分入渗能力也随之发生变化,因此有必要对作物不同生长期的坡耕地土壤水分入渗过程进行研究。因此,笔者以径流小区上大豆(*Glycine max* L.) 不同生长期(初花期、末花期、结荚期、始粒期)的坡耕地为研究对

象,并以裸坡为对照,通过人工模拟降雨实验方法,对种植有大豆的坡耕地在不同生长期的入渗过程及特征进行分析,并模拟降水入渗过程,旨在探寻坡耕地在作物不同生长期内降水入渗性能,用以阐明坡耕地种植作物的防蚀机制,为提高坡耕地水土流失治理、水分利用与管理提供依据。

1 试验区特征

试验是在位于陕西省杨凌高新农业示范区的西北农林科技大学资源环境学院水土保持工程实验室径流小区上进行的。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,夏热多暴雨,秋凉多连阴雨。年日照时间 2 163.8 h,日照百分率 49%。年平均气温 12.9 °C,最冷月(1 月)平均气温 -1.2 °C,最热月(7 月)平均气温 26.1 °C。平均早霜始于 11 月 2 日,晚霜终于 3 月 26 日,无霜期 220 d。年平均降水量 637.6 mm,年降水量的 60% 集中于 7—10 月,且多大到暴雨,多年平均蒸发量 884.0 mm。土壤类型为壤土,经过人为耕作活动熟化,形成了一种有机质质量分数较高、肥沃的农耕土壤。

2 试验内容与方法

径流小区建于 2008 年,长 3.0 m,宽 1.0 m,坡度为 5°、10°和 15°,分 3 组 12 个小区。土壤为当地的 0 ~ 20 cm 耕层土壤。选取的作物为大豆,品种为中黄 13。在种植大豆前对小区进行翻耕整地,并用磷酸二铵((NH₄)₂HPO₄)按 900 ~ 1 000 kg/hm²作为基肥播撒;在开花期、结荚期进行追施 300 ~ 600 kg/hm²。人工播种,种植株行距为 20 cm × 40 cm,其余的耕作管理跟当地农田管理一致。为了消除土壤初始含水量的影响,每次试验前一天用小降雨强度的模拟降雨,在坡面即将产流前停止降雨。为了研究不同生长期坡面入渗特征,根据 W. R. Fehr 等^[24]提出的大豆生育期的鉴定方法,选取了 4 个大豆生长期,即初花期(R₁)、末花期(R₂)、结荚期(R₄)和始粒期(R₅),分别进行径流小区人工模拟降雨实验。同时采用叶面积指数(Leaf Area Index, I_{LA})来

表征大豆生长期的变化,在每个生长期试验前测定叶面积指数。降雨时间选在一天中风力较少的早晨或傍晚。

试验采用人工模拟降雨的方法进行。根据杨凌区志得出试验区夏秋两季多大到暴雨的特点,其降雨强度范围为 20~120 mm/h,故本试验设计降雨强度为 40 和 80 mm/h^[25]。降雨装置为中国科学院水利部水土保持研究所生产的侧喷式降雨机,降雨高度为 7.5 m,有效降雨面积为 5.0 m×7.0 m。降雨均匀度 80% 以上。在降雨试验前需对降雨机进行率定。降雨实验开始前分别在径流小区两侧摆置降雨机,呈对喷形式。通过控制不同喷头规格的进水阀门压力表获得不同降雨强度。本试验设计目标降雨强度为 40 和 80 mm/h。降雨历时均为 60 min,在每个小区的上、中、下部各放置 1 个雨量筒测定降雨强度。待坡面产流开始后用小塑料桶收集产流量,每隔 2 min 收集 1 min 的产流量。在降雨试验后测定雨量筒水量,以计算每场降雨的实际降雨强度,并将收集到的径流桶称量用以推求降雨中坡面的入渗

过程。

3 结果与分析

利用雨量筒测出实际降雨强度与径流资料计算坡面随降雨历时变化的坡面入渗率

$$i = (ISt - R) / t。$$

式中: i 为坡面入渗率, mm/min; I 为降雨强度, mm/min; S 为坡面垂直投影面积,即受雨面积, mm²; t 为接径流的时间段, min; R 为径流量, mL。表 1 为大豆不同生长期坡地及裸地对照组坡面产流产沙及入渗特征情况统计表。

3.1 入渗过程及其影响因素

种植有大豆的坡耕地随着大豆生长期的变化,下垫面也随之变化。除了地上冠层部分改变了降雨再分配而影响坡面的入渗外,大豆根系也能改良土壤结构,一定程度上提高了坡面入渗能力。

与一般裸地入渗过程特征相似,大豆坡地的入渗过程曲线也是一条下凹曲线。即降雨前期土壤的初始入渗率很高,入渗量很大;而在降雨后期,入渗

表 1 大豆不同生长期坡地及对裸地坡面产流产沙及入渗特征

Tab. 1 Runoff, sediment production and infiltration of slope land in all growth periods and bare slope under simulated rainfalls

坡度 Slope/ (°)	生长期 Growth stages	40 mm/h					80 mm/h				
		径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient	产沙量 Sediment/ (g·m ⁻²)	含沙量 Sediment content/ (g·L ⁻¹)	累计入渗量 Cumulative infiltration/ mm	径流量 Runoff/ mm	径流系数 Runoff coefficient	产沙量 Sediment/ (g·m ⁻²)	含沙量 Sediment content/ (g·L ⁻¹)	累计入渗量 Cumulative infiltration/ mm
5	R ₁	15.63	0.41	65.3	4.10	22.50	38.75	0.52	172.92	4.56	35.83
	R ₂	16.05	0.38	51.69	3.17	26.67	33.32	0.42	134.76	4.08	46.12
	R ₄	12.63	0.29	23.82	1.77	30.75	34.85	0.42	163.72	3.74	47.37
	R ₅	9.52	0.21	14.98	1.47	35.60	28.95	0.34	54.62	1.72	56.67
10	R ₁	23.06	0.53	109.68	4.77	20.62	41.31	0.54	257.67	5.17	35.07
	R ₂	17.39	0.44	80.40	4.43	22.09	41.27	0.53	210.51	5.12	37.29
	R ₄	14.90	0.36	52.02	3.41	26.92	42.11	0.52	134.19	3.43	38.27
	R ₅	14.18	0.33	26.08	2.14	29.43	34.72	0.41	96.6	2.38	49.51
15	R ₁	24.28	0.58	176.53	6.19	17.54	50.57	0.66	345.74	6.17	25.93
	R ₂	20.99	0.48	120.42	5.42	22.39	46.30	0.58	305.66	5.78	33.02
	R ₄	19.62	0.44	74.04	3.79	24.96	45.75	0.55	205.06	4.44	36.99
	R ₅	18.23	0.40	45.50	2.61	27.07	39.70	0.48	138.46	3.34	43.82
5		25.91	0.58	119.30	5.72	18.79	48.99	0.6	265.67	5.61	32.48
10	CK	29.41	0.64	177.52	7.53	16.79	57.32	0.68	431.16	7.72	27.39
15		28.92	0.67	190.10	8.29	14.56	67.67	0.78	531.98	9.08	18.55

注: R₁: 初花期; R₂: 末花期; R₄: 结荚期; R₅: 始粒期; CK: 对照组裸坡。下同。Note: R₁: initial flowering stage, R₂: late flowering stage, R₄: pod bearing stage, R₅: maturity starting stage, CK: control group. The same here in after.

量减少,趋于相对稳定的状态;中期入渗率处于波动状态,但总体趋于减少。这一特征主要是由于大豆生长阶段不同,其根系的穿插空间和枝叶的覆盖面积不同而造成的。图 1 反映的就是大豆初花期、末花期、结荚期、始粒期 4 个生长期及裸地在 40 和 80 mm/h 降雨强度下的入渗特征,可以看出,在产流前坡面的入渗率等于降雨强度,而产流开始后 3 min 的入渗率最高,可视为初始入渗率。对比在大豆不同生长期坡面的入渗过程可以发现各生长期坡面的入渗过程变化趋势相似。初始入渗率都相对较高,随着降雨历时的推进,入渗率波动减少,逐渐降低并慢慢趋于稳定入渗状态。在降雨过程后 6 min 的入渗率达到基本稳定。由图 1(a) 和 (b) 可知,在不同

降雨强度和坡度条件下,各生长期的初始入渗率和稳定入渗率总体呈现出 $R_5 > R_4 > R_2 > R_1 > CK$ 的变化趋势。为研究各生长期坡地降雨入渗的变化规律,以 5° 初花期的坡面为例,在 40 mm/h 小降雨强度条件下,土壤入渗量较大,其初始产流时间为 5.82 min,初始入渗率是 0.637 mm/min,在经过 60 min 降雨后,入渗速率逐渐下降,入渗率趋于达到稳定状态,稳定入渗率为 0.320 mm/min,其平均入渗率为 0.363 mm/min。而在始粒期 5° 的坡面直到降雨起始后 19.18 min 才开始产流,其产流时间比初花期推迟了 13.36 min,其坡面的初始入渗率为 0.752 mm/min,之后快速下降,达到稳定入渗率为 0.482 mm/min,平均入渗率为 0.533 mm/min,增幅

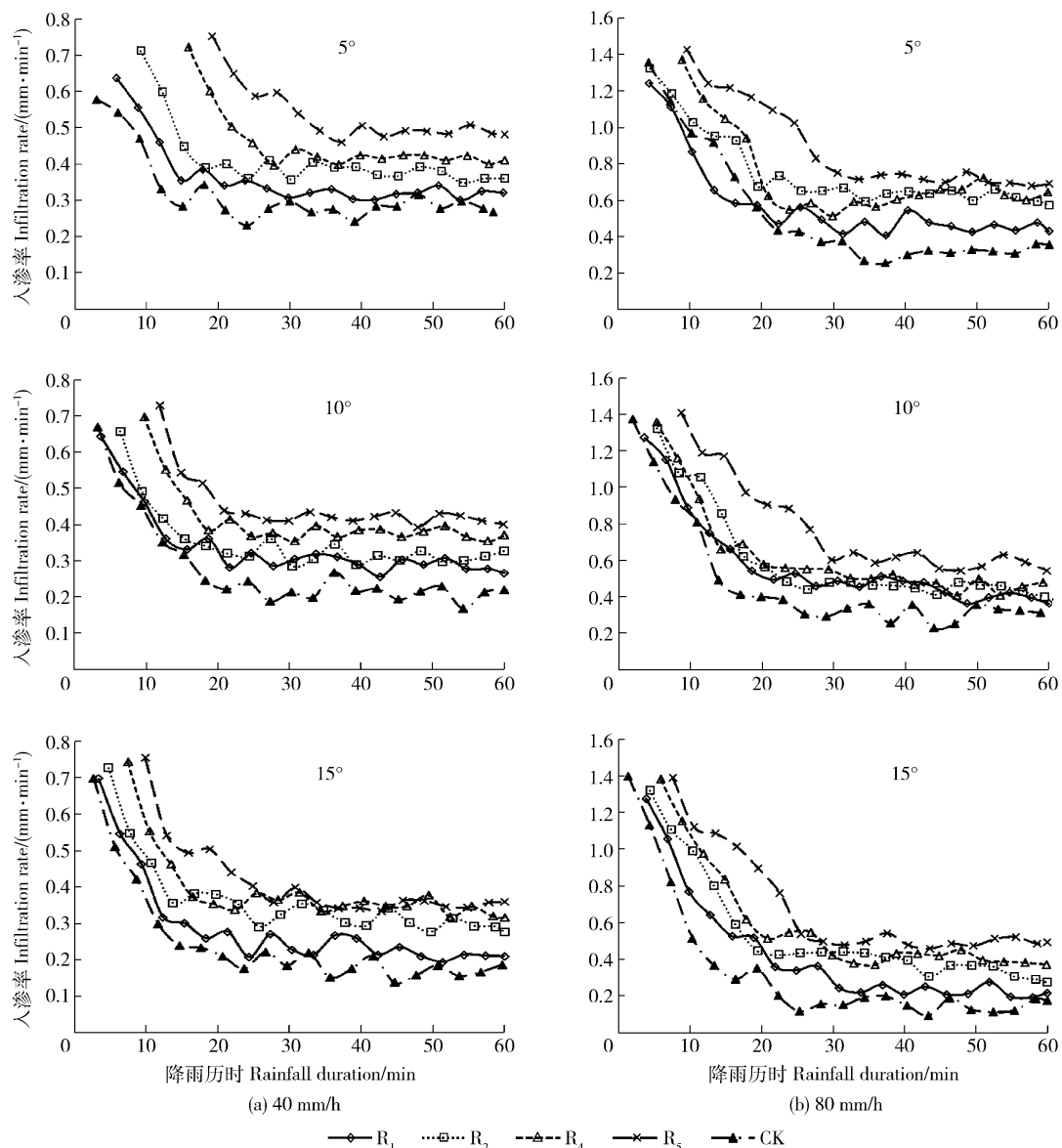


图 1 各生长期坡面及裸地人工模拟降雨条件下土壤入渗曲线

Fig. 1 Infiltration curves of sloping land in all growth stages and bare slope under simulated rainfalls

分别为 18.0%、50.6% 和 46.8%。在 80 mm/h 的降雨强度下,坡面降雨入渗过程曲线基本与 40 mm/h 相似,仅仅是产流时间提前,产流后入渗率下降更迅速,达到稳定入渗率所需时间更少。这充分反映了坡面大豆生长期的更迭对坡耕地降雨入渗能力的提高有促进影响。

在大豆同一生育期和坡度条件下,通过比较 2 种降雨强度下坡面初始入渗率和稳定入渗率的关系可明显看出,随着降雨强度的增加,坡面初始入渗率和稳定入渗率是增大的,而且差异非常显著。当坡度为 10°,生长期为结荚期时,在 40 mm/h 降雨强度条件下,坡面的初始入渗率、稳定入渗率和平均初始入渗率分别为 0.70 mm/min、0.37 mm/h 和 0.41 mm/h; 80 mm/h 降雨强度条件下,初始入渗率、稳定入渗率和平均初始入渗率分别为 1.36 mm/min、0.48 mm/h 和 0.62 mm/h,其初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率分别是 40 mm/h 降雨强度的 1.95、1.29、1.51 倍。

在本研究中,坡面入渗能力随着坡度的增大而减少。5°坡面的初始入渗率为 0.637 ~ 0.752 mm/min,15°坡面的初始入渗率为 0.647 ~ 0.755 mm/min,差异不明显。5°坡面的稳定入渗率为 0.320 ~ 0.482 mm/min,15°坡面的稳定入渗率为 0.210 ~ 0.359 mm/min,减少了 26.1%,平均入渗率随着坡度增加也减少了 17.8%。可见,随着大豆生长期的变化,一方面由于作物冠幅的增大对降雨的截留作用及减少了雨滴机械打击作用,减少了坡表面形成结皮的几率和面积,另一方面由于根系的变化,能改善土壤的物理性状,增加了土壤入渗能力;因此,农作物通过冠幅和根系的作用提高了坡面的水分入渗能力,使降雨前期有较多水分进入土壤,推迟了坡面产流历时,从而导致不同生长期坡面入渗过程及特征差异明显。

此外,由于黄土高原地区的天然降水量少,水资源缺乏,坡耕地降雨入渗是土壤水分的主要来源,直接影响着农作物的产量;因此,在降雨过程中累计入渗量(accumulative infiltration amount F)和入渗补给系数(recharge coefficient of rainfall infiltration R_c)反映降水向土壤水分转化的数量和比例,也是反映土壤入渗能力重要参数。图 2 示出各生长期的坡面累积入渗量的变化趋势,可以看出随着叶面积指数的增大,累积入渗量的变化势表现为增加趋势,即 $R_5 > R_4 > R_2 > R_1 > CK$ 。当降雨强度为 40 mm/h、坡度为 5°时,裸地的累积入渗量为 18.79 mm,初花期

的累计入渗量为 22.5 mm,末花期为 26.67 mm,结荚期为 30.75 mm,始粒期为 35.60 mm/m。相比于裸地,依次增大了 19.75%、41.93%、63.63% 和 89.47%。在相同降雨强度和坡度下,坡面累积入渗量增大,说明种植有作物的坡地的累积入渗量显著大于裸地的,随着作物生长期的变化能对增大土壤入渗有积极作用,且叶面积指数愈大效果越显著。统计分析发现累积入渗量随降雨历时呈现幂函数关系且拟合最优,相关系数均达到极显著水平(表 2)。

表 3 表示的是大豆各生长期及裸地坡面在不同降雨条件下的补给系数,可以看出,种植大豆的坡地补给系数均大于裸地的补给系数,且补给系数随着生长期叶面积指数的增加而增大,意味着降雨转化为土壤水分更多。在各降雨强度条件下,种有大豆的坡地其入渗补给系数最小值均出现在初花期的 15°坡面,最大值出现在始粒期的 5°坡面。可见入渗补给系数随着生长期的变化而增大,随坡度的增大而减少。当降雨强度为 40 mm/h 时,坡地补给系数平均值为 0.596;降雨强度为 80 mm/h 的坡地补给系数平均值则为 0.502。另一方面在 80 mm/h 降雨强度下,同一生长期和同一坡度的坡面补给系数均少于相同条件下降雨强度为 40 mm/h 的补给系数。由于在大降雨强度条件下,虽然降雨来水量大,但同时对坡面的机械作用更强,更易形成结皮,使坡面的产流历时缩短,入渗量相对减少,产流强度更大,从而导致补给系数少于小降雨强度。随着生长期的变化,40 mm/h 降雨强度条件下,裸地的补给系数为 0.363,初花期的补给系数为 0.494,末花期的补给系数为 0.567,而结荚期的补给系数则增加到 0.637,始粒期的补给系数增大为 0.687。可见不同生长期的坡面补给系数表现为 $R_5 > R_4 > R_2 > R_1 > CK$ 。80 mm/h 降雨强度条件下各生长期坡地的补给系数也同样表现出相同的变化规律。

3.2 不同生长期坡耕地入渗模型模拟

目前有很多描述土壤水分入渗过程的模型。主要包括经验性模型(Kostiakov 模型、Horton 模型、入渗通用经验公式)和数学理论模型(Green-Ampt 模型、Philip 模型)^[26-29]。本研究选择 2 种入渗经验公式对获得的入渗实验数据分别进行拟合,探讨入渗模型在大豆不用生长期的坡耕地入渗过程中的是否具有适用性。

1) Horton 模型:

$$i = i_c + (i_0 - i_c) e^{-kt}$$

2) Kostiakov 模型:

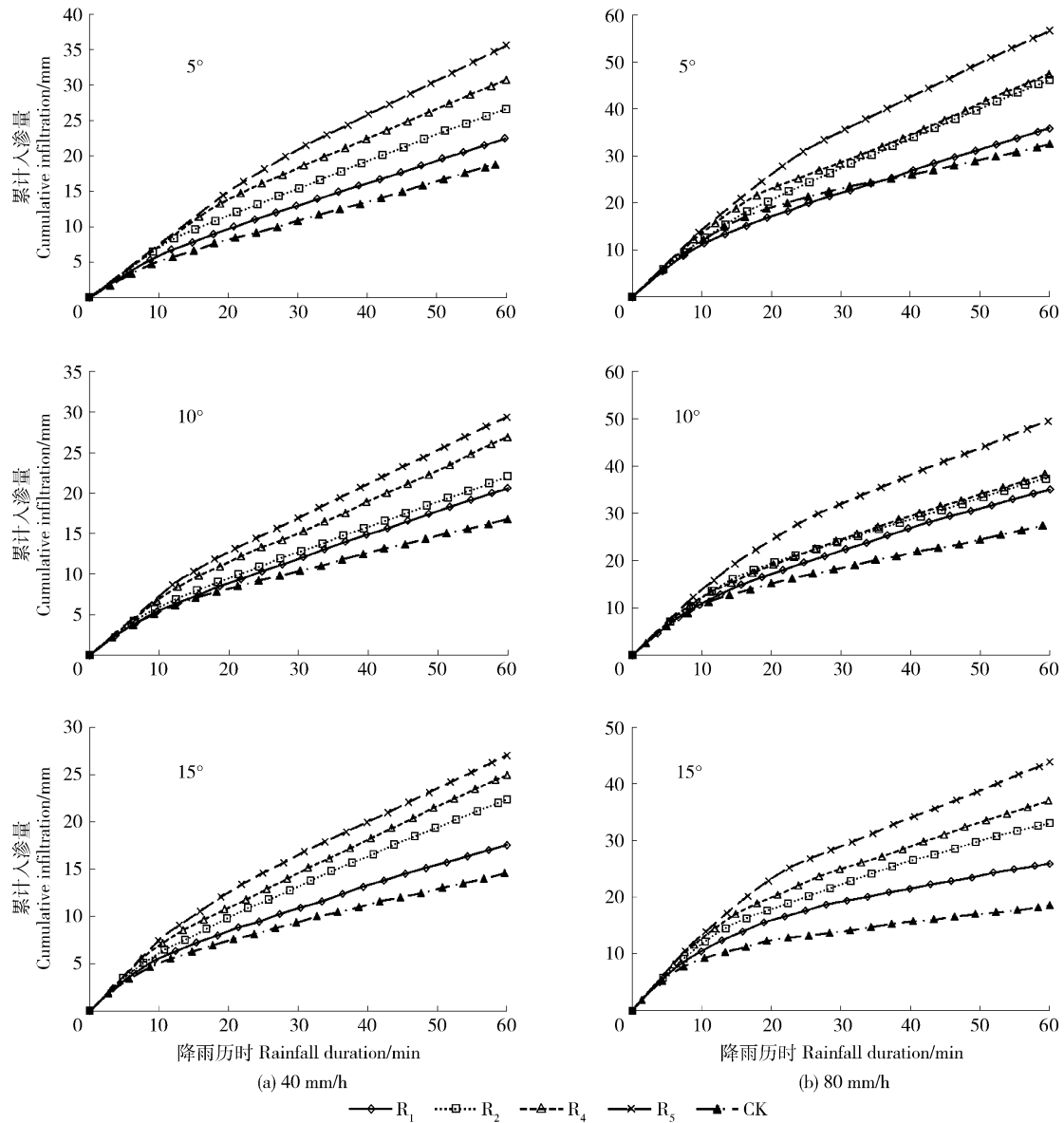


图 2 各生长期坡面及裸坡人工模拟降雨条件下土壤累积入渗量曲线

Fig. 2 Cumulative infiltration of sloping land at all growth stages and bare slopes under simulated rainfalls

$$i = at^{-b}$$

式中: i 为入渗率, mm/min; i_0 为初始入渗率, mm/min; i_c 为稳定入渗率, mm/min; t 为入渗时间, min; k 、 a 、 b 均为经验常数。

通过采用以上 2 个入渗模型对大豆 4 个生长期 3 个坡度的坡耕地在 2 个降雨强度条件下的入渗实验数据进行模型拟合, 利用最小二乘法得出模型的优化参数(表 4)。首先用 Horton 模型拟合时, 当降雨强度为 40 mm/h 时 5° 小区大豆不同生长期的初始入渗率分别为 1.12、3.20、4.24 和 4.74 mm/min; 稳定入渗率分别为 0.32、0.37、0.41 和 0.48 mm/min, 即始粒期最大, 结荚期和末花期次之, 初花期最小, 这与降雨实测得出结果相符合。而当在 40

mm/h 降雨强度下, 始粒期各坡面的初始入渗率在同一降雨强度和生长期条件下, 不同坡度的初始入渗率入渗分别为 4.74、3.50 和 1.81 mm/min, 稳定入渗率分别为 0.48、0.42、0.35 和 0.48 mm/min, 即 5° 最大, 10° 次之, 15° 最小。这与降雨实测得出的结果相符合, 其他条件下也表现出同样的入渗特征。 k 值的大小反映的是入渗过程递减变化状况, k 值越大, 入渗速率随时间减少越慢, 反之则快。

由表 4 可以看出: 降雨强度为 40 mm/h 时 k 变化范围为 0.14 ~ 0.25; 降雨强度 80 mm/h 条件下 k 变化范围为 0.06 ~ 0.15。这表明在大降雨强度条件下土壤入渗递减速率大于小降雨强度条件。总之, Horton 模型所拟合出的结果与实测相比较, 反映了

表 2 累计入渗率与降雨历时回归方程

Tab. 2 Regression equations between cumulative infiltration and duration of rainfall events

生长期 Growth stages	I_{LA}	坡度 Slope/(°)	40 mm/h		80 mm/h	
			拟合方程 Fitting equations	R^2	拟合方程 Fitting equations	R^2
R ₁	1.85	5	$F = 0.993t^{0.760}$	0.999	$F = 2.248t^{0.674}$	0.999
		10	$F = 0.916t^{0.759}$	0.999	$F = 2.383t^{0.657}$	0.999
		15	$F = 1.157t^{0.662}$	0.999	$F = 3.432t^{0.498}$	0.993
R ₂	3.44	5	$F = 1.198t^{0.756}$	0.999	$F = 2.186t^{0.744}$	0.999
		10	$F = 1.005t^{0.751}$	0.999	$F = 2.922t^{0.622}$	0.998
		15	$F = 1.081t^{0.739}$	0.999	$F = 3.064t^{0.583}$	0.998
R ₄	4.88	5	$F = 1.504t^{0.735}$	1.000	$F = 2.895t^{0.678}$	0.997
		10	$F = 1.111t^{0.774}$	0.998	$F = 2.723t^{0.646}$	0.999
		15	$F = 1.200t^{0.739}$	0.999	$F = 3.405t^{0.583}$	0.998
R ₅	6.78	5	$F = 1.476t^{0.777}$	1.000	$F = 2.983t^{0.720}$	0.998
		10	$F = 1.268t^{0.766}$	0.999	$F = 3.267t^{0.666}$	0.998
		15	$F = 1.512t^{0.703}$	1.000	$F = 3.525t^{0.615}$	0.997
CK		5	$F = 0.798t^{0.773}$	0.998	$F = 3.648t^{0.534}$	0.993
		10	$F = 1.150t^{0.652}$	0.999	$F = 2.783t^{0.558}$	0.996
		15	$F = 1.203t^{0.607}$	0.999	$F = 3.302t^{0.423}$	0.989

注: I_{LA} 为叶面积指数; F 为累计入渗量; t 为入渗时间。Note: I_{LA} : leaf area index; F : accumulative infiltration amount; t : infiltration time.

表 3 各生长期坡面及裸坡的补给系数

Tab. 3 Recharge coefficient (R_c) of sloping land and bare slope at growth stages

坡度 Slope/(°)	40 mm/h					80 mm/h				
	R ₁	R ₂	R ₄	R ₅	CK	R ₁	R ₂	R ₄	R ₅	CK
5	0.59	0.62	0.71	0.79	0.42	0.48	0.58	0.58	0.66	0.40
10	0.47	0.56	0.64	0.67	0.36	0.46	0.47	0.48	0.59	0.32
15	0.42	0.52	0.56	0.60	0.33	0.34	0.42	0.45	0.52	0.22

坡面在大豆不同生长期的入渗过程特征变化及其存在的差异。Kostiakov 模型模拟的结果显示: 当 40 mm/h 时 a 值的范围为 0.95 ~ 2.01; 80 mm/h 时, a 值的范围为 2.23 ~ 4.37。表明在 80 mm/h 时的初始入渗率大于 40 mm/h 的初始入渗率。在相同条件下 a 值随着的坡度增大而减少, 随着生长期增加而增大, 表明了不同生长期的坡面在不同降雨强度条件下初始入渗率的变化特征。 b 值反映的是入渗过程递减变化状况, b 值越大, 入渗速率随时间减少越快, 反之则慢。从表中可以看出: 当 40 mm/h 时, b 值的范围在 0.30 ~ 0.47 之间; 80 mm/h 时 b 值的范围在 0.34 ~ 0.70 之间。说明降雨强度为 80 mm/h 时相比于 40 mm/h 的入渗速率递减较快。可见 Kostiakov 模型也能可以反映坡面在大豆不同生长期的

入渗特征。

为了进一步明确 2 种入渗模型对降雨实测速率的拟合情况, 分别用 Horton 模型和 Kostiakov 模型计算相对应的预测值, 并与实测值结合绘制入渗过程曲线图, 结果见图 3 (由于限于篇幅, 本文只列出了始粒期的入渗模拟结果), 从而可以更简洁直观表示模型预测值与降雨实测值在入渗不同阶段的偏差。根据降雨实测土壤入渗过程图可将其划分为 3 个入渗阶段: 初渗阶段(0 ~ 15 min)、渐变阶段(15 ~ 45 min) 和稳渗阶段(45 ~ 60 min)。由图 3 可知, 在 40 和 80 mm/h 降雨强度条件下, Horton 模型的预测入渗光滑曲线均能很好与有波动的实测入渗过程曲线较吻合。Kostiakov 模型在 80 mm/h 降雨强度条件下能很好地模拟坡面入渗过程, 当 40 mm/h 时,

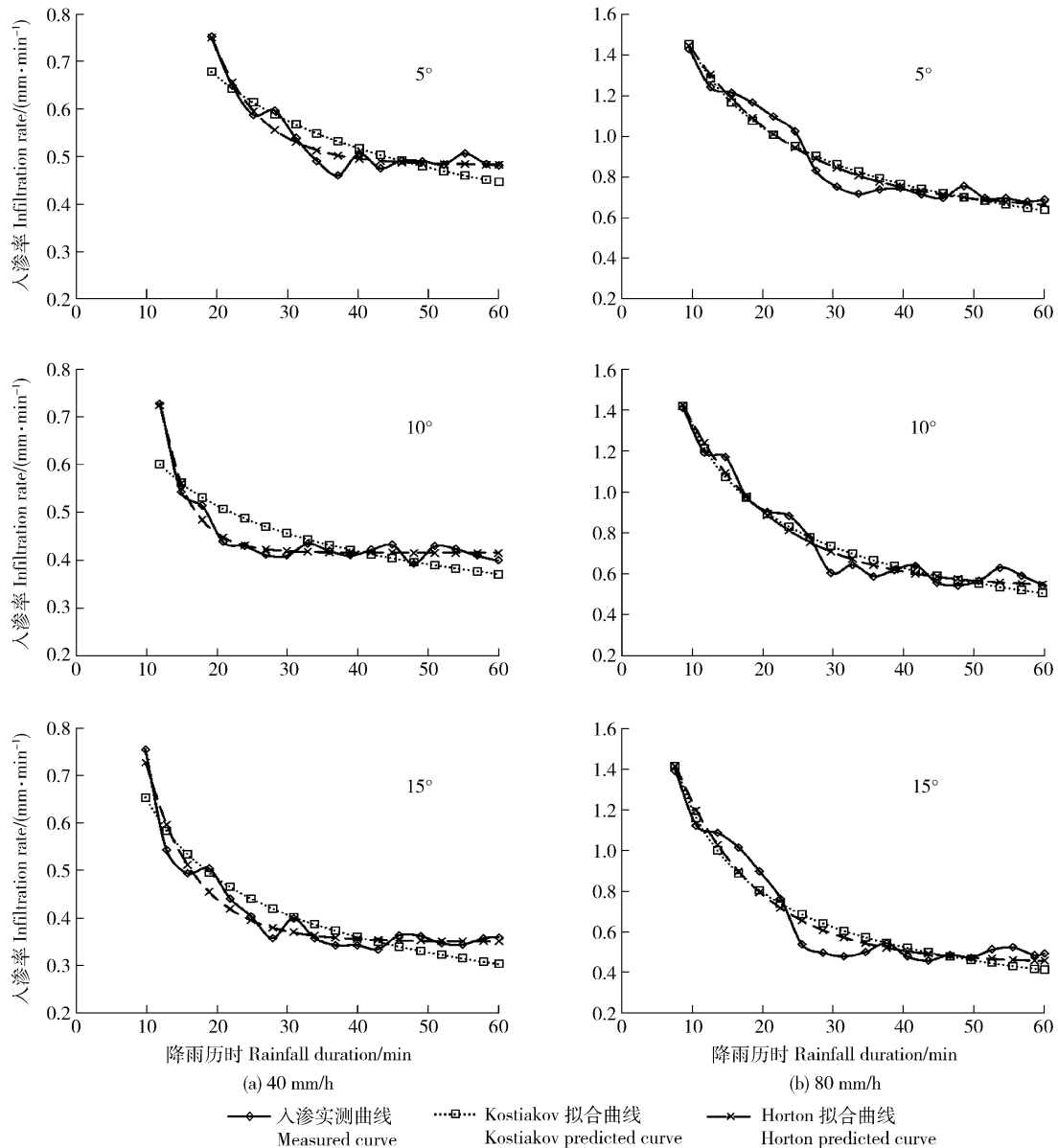


图3 坡面入渗曲线2种入渗模型拟合结果(始粒期)

Fig.3 Results of Horton and Kostiakov infiltration models of soil infiltration (growth stage: R_5)

在初渗阶段 Kostiakov 模型预测值与实测值偏少,在渐变阶段则偏大,而在稳渗阶段偏少且随降雨历时延长,偏差越大。

此外, Horton 模型的 R^2 在 0.89 ~ 0.98 之间,平均值为 0.96, Kostiakov 模型的 R^2 在 0.65 ~ 0.96 之间,平均值为 0.95,均达到了极显著水平。这反映了模型拟合值与之相对应的实测值之间的拟合程度,二者的拟合优度都比较高且 Horton 模型的拟合效果优于 Kostiakov 模型。需注意的是 Kostiakov 模型对不同降雨强度所拟合出的结果存在差异:当为 40 mm/h 时的 R^2 在 0.65 ~ 0.93 之间,平均值为 0.78; 80 mm/h 时的 R^2 在 0.71 ~ 0.96 之间,平均值

为 0.92。可见 Kostiakov 模型在大降雨强度条件下的模拟效果优于小降雨强度。另一方面,从表 4 可以看出各模型的均方根误差 RMSE (root-mean-square error) 变化范围,是衡量入渗模型模拟值与降雨实验观测值之间的偏差。Horton 模型 RMSE 在 0.014 ~ 0.079 之间,平均值为 0.034, Kostiakov 模型的相关系数 RMSE 在 0.032 ~ 0.125 之间,平均值为 0.055。这也体现了 Horton 模型的拟合效果优于 Kostiakov 模型。

因此,由拟合结果表明 2 个入渗模型拟合效果较好且能反映大豆坡耕地在不同生长期的入渗过程及其特征。

表 4 Horton 模型和 Kostiakov 模型模拟结果及均方根误差
Tab. 4 Parameters of Horton and Kostiakov infiltration models of different growth stages periods and its RMSE (root-mean-square error)

降雨强度 Rainfall intensity / (mm·h ⁻¹)	生长期 Growth stages	坡度 Slope / (°)	Horton 模型 Horton model				Kostiakov 模型 Kostiakov model				
			初始入渗率 initial infiltration rate i_0 / (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率 stable infiltration rate i_c / (mm·min ⁻¹)	k	R^2	均方根 误差 RMSE	a	b	R^2	均方根 误差 RMSE
40	R ₁	5	1.12	0.32	0.15	0.96	0.017	1.05	0.33	0.84	0.035
		10	0.91	0.29	0.14	0.96	0.020	0.95	0.33	0.90	0.032
		15	1.01	0.22	0.14	0.97	0.023	1.21	0.47	0.93	0.034
	R ₂	5	3.20	0.37	0.22	0.95	0.022	1.28	0.34	0.70	0.050
		10	1.63	0.31	0.21	0.96	0.017	1.04	0.33	0.76	0.043
		15	1.21	0.31	0.17	0.95	0.024	1.16	0.37	0.88	0.036
	R ₄	5	4.24	0.41	0.21	0.97	0.014	1.80	0.39	0.68	0.048
		10	3.35	0.37	0.23	0.97	0.015	1.19	0.32	0.68	0.047
		15	2.55	0.35	0.23	0.96	0.021	1.28	0.36	0.74	0.052
	R ₅	5	4.74	0.48	0.14	0.94	0.018	2.01	0.37	0.77	0.038
		10	3.50	0.42	0.25	0.97	0.014	1.26	0.30	0.65	0.047
		15	1.81	0.35	0.14	0.95	0.023	1.74	0.43	0.84	0.041
	CK	5	0.80	0.27	0.14	0.89	0.031	0.80	0.29	0.78	0.043
		10	0.93	0.21	0.13	0.97	0.023	1.16	0.47	0.93	0.034
		15	0.96	0.17	0.15	0.98	0.021	1.18	0.52	0.95	0.031
80	R ₁	5	1.95	0.45	0.13	0.96	0.045	2.42	0.45	0.91	0.069
		10	1.73	0.40	0.11	0.97	0.040	2.40	0.46	0.95	0.053
		15	1.79	0.20	0.10	0.99	0.033	3.57	0.70	0.96	0.057
	R ₂	5	1.76	0.60	0.10	0.96	0.041	2.23	0.34	0.93	0.056
		10	2.10	0.42	0.11	0.96	0.052	3.41	0.55	0.92	0.073
		15	1.93	0.33	0.10	0.97	0.053	3.40	0.60	0.95	0.067
	R ₄	5	3.80	0.60	0.15	0.89	0.079	3.59	0.48	0.71	0.125
		10	2.23	0.46	0.12	0.95	0.040	3.15	0.52	0.94	0.060
		15	2.32	0.38	0.11	0.98	0.041	4.37	0.64	0.95	0.061
	R ₅	5	2.13	0.63	0.06	0.95	0.053	4.01	0.45	0.93	0.062
		10	2.27	0.53	0.08	0.97	0.046	4.54	0.54	0.95	0.057
		15	2.29	0.48	0.09	0.94	0.066	4.72	0.60	0.91	0.081
	CK	5	1.93	0.28	0.09	0.97	0.054	3.69	0.63	0.93	0.086
		10	1.71	0.28	0.11	0.97	0.057	2.07	0.50	0.90	0.099
		15	1.69	0.14	0.13	0.98	0.049	1.81	0.59	0.88	0.120

4 结论

与裸坡相比,随着大豆生长期更迭,各生长期的初始入渗率、稳定入渗率和累计入渗量总体呈现出 $R_5 > R_4 > R_2 > R_1 > CK$ 变化趋势。坡面入渗能力与坡度呈负相关关系,而与降雨强度则成正相关关系。此外,入渗补给系数随着生长期变化而增加,处于同

一生长期的不同坡面随着坡度的增大而减少。在大降雨强度条件下,同一生长期和同一坡度的坡面补给系数少于相同条件下小降雨强度的补给系数。采用 Horton 和 Kostiakov 模型对降雨实测入渗数据进行拟合结果表明:二者的拟合优度都比较高。其中 Horton 模型的拟合效果优于 Kostiakov 模型,相关系数高且均方根误差较少, Kostiakov 模型在大降雨强

度条件下的模拟效果优于小降雨强度。总之, 2 个人入渗模型能反映大豆坡耕地在不同生长期的入渗过程及其特征。

5 参考文献

- [1] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报, 1998, 43(2): 200-203
- [2] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- [3] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌 等. 野外模拟降雨条件小坡面降雨入渗—产流试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 5-8
- [4] 杨培岭. 土壤与水资源学基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- [5] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration [J]. Catena, 1994(23): 99-110
- [6] Bodman G B, Colnam E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1944, 8(2): 166-182
- [7] Hawke R M, Price A G, Bryan R B. The effect of initial soil water content and rainfall intensity on near-surface soil hydrologic conductivity: A laboratory investigation [J]. Catena, 2006, 65(3): 237-246
- [8] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌 等. 土壤初始含水量对黄土坡地水分运动与转化特征的影响[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(2): 144-148
- [9] Ram A, Aaron Y. Negative and positive effects of topsoil biological crusts on water availability along a rainfall gradient in a sandy arid area [J]. Catena, 2007, 70(3): 437-442
- [10] Ran Qihua, Su Danyang, Li Peng, et al. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424/425: 99-111
- [11] Koulouri M, Giourga C. Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands [J]. Catena, 2007, 69(3): 274-281
- [12] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing [J]. Catena, 2006, 66(3): 211-220
- [13] 李卓, 吴普特, 冯浩 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45
- [14] 张兴昌, 邵明安, 黄明斌 等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响 [J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1038-1044
- [15] Fu Bojie, Hu Chenxia, Chen Liding, et al. Evaluating the change of the ecological sustainability of agricultural landscape between 1980 and 2000 in the Loess hilly area, China—A case study in Ansai County [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 114: 387-396
- [16] Verstraeten G, Prosser I P, Fogarty P. Predicting the spatial patterns of hillslope sediment delivery to river channels in the Murrumbidgee catchment, Australia [J]. Journal of Hydrology, 2007, 334(3/4): 440-454
- [17] Barley K P. Effects of root growth and decay on the permeability of a synthetic sandy loam [J]. Soil Science, 1954, 78(3): 205-210
- [18] Gish T J, Jury W A. Effect of plant roots and root channels on solute transport [J]. Transactions of the ASAE, 1983, 26: 440-444
- [19] Meek B D, Detar W R, Rolph D, et al. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system [J]. Soil Science Society of American Journal, 1990, 54(2): 505-508
- [20] 袁建平, 雷廷武, 郭素彦 等. 黄土丘陵区小流域土壤入渗速率空间变异性 [J]. 水利学报, 2001(10): 88-92
- [21] 李斌兵, 郑粉莉. 黄土坡面不同土地利用下的降雨入渗模拟与数值计算 [J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 118-123
- [22] 李毅, 邵明安. 人工草地覆盖条件降雨入渗影响因素的实验研究 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 18-23
- [23] 宋孝玉, 康绍忠, 沈冰 等. 黄土区不同下垫面农田降雨入渗及产流关系的数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 1-5
- [24] Fehr W R, Caviness C E, Burmood D T, et al. Stage of development descriptions for soybeans *Glycine max* (L.) Merrill [J]. Crop Science, 1971, 11(6): 929-931
- [25] 杨凌区地方志编撰委员会. 杨凌区志 [M]. 西安: 西安地图出版社, 2004
- [26] Kostiaikov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from dynamic point of view for purpose of amelioration [J]. Trans 6th Int Soc Soil Science, Russian Part A, 1932, 97: 17-21
- [27] Horton R E. An application toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1940, 5: 399-417
- [28] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: The flow of air and water through soil [J]. Journal of Agriculture Science, 1911, 4: 1-24
- [29] Philip J R. The theory of infiltration: 5. The influence of the initial moisture content [J]. Soil Science, 1957, 84(4): 329-339

(责任编辑: 程 云)