

文章编号: 1006-4710(2015)01-0013-06

谷子坡地的降雨入渗特征与模拟

吴佳¹, 王林华², 李占斌¹

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用人工模拟降雨方法, 以谷子为对象, 在 $3^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的坡地小区上分析研究了谷子坡地的入渗特征。结果表明: 在实验条件下, 入渗率随时间延长虽有小的波动, 但总体呈下降趋势, 符合幂函数规律, 且与对照相比, 能提高土壤入渗量; 从拔节初期到灌浆初期, 谷子坡地的入渗能力逐渐增加; Kostiakov、Horton、Philip 和蒋定生入渗模型拟合证实, Kostiakov 模型适合谷子全生育期水分入渗模拟, 但估算量平均偏低 10%。

关键词: 谷子坡地; 降雨入渗; 模型模拟; 黄土高原

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Characteristics and simulation of water infiltration in millet slope farmland under simulated rainfall

WU Jia¹, WANG Linhua², LI Zhanbin¹

(1. Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710004, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: By taking Millet as the research object, the characteristics of soil water infiltration are studied in the runoff plots (3° , 5° , 10° , 15°) by adopting the method of artificial simulation rainfall. The results show that the infiltration rate in millet slope farmland generally presented a decreasing tendency and fitted with the power function laws with a small fluctuation of time prolong in infiltration rate under the experiment conditions. Compared with the control group, the accumulated infiltration amount in soil can be increased. Infiltration rate in Millet slope land can gradually increase from early jointing to milk-filling stages. It has been proved through the infiltration model fitting of Kostiakov, Horton, Philip and Jiang Dingsheng that Kostiakov model can adapt to the moisture infiltration simulation during the whole stage of millet growth and development, but the estimated amount is 10% lower than the average values.

Key words: millet slope farmland; rainfall infiltration; infiltration model; Loess Plateau

黄土高原地区有坡耕地 870.05 万 hm^2 , 占全国坡耕地总面积的 18.7%^[1]。坡耕地的土壤侵蚀量占流域总侵蚀量的 50%~60%, 故坡耕地的水土流失成因与保持一直是人们普遍关注的重要问题^[2]。唐克丽等从浅沟发育的临界坡度入手, 得出黄土丘陵区退耕还林(草)的坡度界线应在 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 左右^[3]。因此, 15° 或 20° 以下耕地仍然是该区粮食生产的主要用地。

谷子(*Setaria italica*)是该地区种植的主要作物之一。与其他作物一样, 水肥管理, 特别是水的管理

对其稳产与高产至关重要, 故降雨入渗就成为水分管理的主要研究内容之一。以往的土壤入渗研究多是在裸露的平地或人为对有植被的坡面进行整平后, 采用双环法进行观测与分析^[4]。后来, 随着人工模拟降雨技术的发展, 人们也在野外不同土地的坡面上和室内不同规格的冲刷槽中进行入渗规律的实验与研究^[5]。近年来, 为了认识作物对喷灌均匀度及效率的影响, 一些学者也开始了作物冠层对降雨的再分配的研究, 为深入理解种植作物农田的入渗特征提供了途径^[6-8]。但作物在不同生育期, 其冠

收稿日期: 2014-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41271288)。

作者简介: 吴佳, 女, 博士生, 研究方向为水土资源过程与生态环境保护。E-mail: wjwujia@sina.cn。

通讯作者: 李占斌, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zbli@mail.xaut.edu.cn。

幅、叶面积和根系的发育程度不同,对减少径流量、增加毛管及孔隙度等的作用也就出现了差异,从而影响到降雨入渗量的大小。但目前针对这一特征的研究报导还不多见。

为此,课题组自2006年以来,以玉米、大豆、谷子和冬小麦为对象,展开了其防蚀机理的系统研究,降雨入渗就是该研究的内容之一。现以80 mm/h降雨条件下的谷子坡地为例,就入渗特征进行研究与分析,以服务于农业生产实践。

1 研究方法

实验是在西北农林科技大学水土保持与荒漠化防治教学实验基地的径流小区上完成的。供试作物品种谷子为晋谷29。在播种前按2500 kg/hm²和400 kg/hm²水平一次性施入有机肥(腐熟羊粪和鸡粪)和磷酸二铵后,再进行人工翻耕和播种。谷子定苗后的株行距为10 cm×20 cm。生长期的管理按当地农作习惯进行。

1.1 入渗测定

1) 径流小区设计

径流小区建成于2005年,坡度为3°、5°、10°和15°,共4组16个小区,规格为4 m×1 m。小区内装填的土壤为杨凌0~20 cm耕层的壤土,其有机质含量5.0~15.0 g/kg,全氮0.5~1.3 g/kg,碱解氮23.0~80.0 mg/kg,速效磷2.2~23.0 mg/kg,质地粘重^[9]。2011年5月上旬,在各组小区上2个播种谷子,2个为裸露对照。这样,在场降雨下,实现了重复。同年6月中旬定苗管理后进行降雨入渗实验。

2) 模拟降雨

模拟降雨设备来自于中国科学院水土保持研究所水保实验设备工厂设计制造的侧喷式降雨机,降雨高度7.5 mm,有效降雨面积5 m×7 m,率定后雨滴均匀度达90%以上。实验设计雨强为80 mm/h。每次降雨产流后,各小区均按3 min为时间段收集径流泥沙样。降雨的同时,在小区的4个边角上放置量雨筒,收集降雨量。实验操作及泥沙、径流、雨强等测算均按《水土保持试验规范》执行^[10]。

3) 入渗量推算

入渗量推算按水量平衡原理进行。坡面产流过程通常可表为:

$$R(t) = \int_0^t I dt - \int_0^t I_n dt - \int_0^t e dt - \int_0^t S_d dt - \int_0^t f dt \quad (1)$$

式中, $R(t)$ 为径流量; I 为降雨强度; f 为入渗

率; I_n 为植物截留率; e 为蒸散发率; S_d 为填注量。

一般情况下,在降雨过程中 e 可忽略不计; I_n 的数量用喷雾法测定各种作物在各生育期的截留量; S_d 受制于人为管理。实验中,每次降雨结束后,均人为地将小区坡面整平,故 S_d 也可忽略不计。这样,对(1)式微分整理后,入渗率 $f = I' - R - I_n$ 。 I' 为净雨强,即 $I' = I \cos \alpha$, α 为坡度。

1.2 模型模拟

对实验结果,本文采用以下4个常用入渗模型进行模拟与评价。

1) Kostiakov 模型^[11]

Kostiakov于1932年提出了以下经验公式来模拟土壤水分入渗:

$$i = i_1 \cdot t^{-a} \quad (2)$$

式中: t 为入渗时间; i 为 t 时刻的入渗速率; i_1 为第一单位时间的入渗速率; a 为经验常数,由试验资料拟合出的参数。

2) Horton 模型^[12]

Horton提出了以下指数型入渗经验公式:

$$i = i_c + (i_0 - i_c) \cdot e^{-k} \quad (3)$$

式中: i_c 为稳定入渗率; i_0 为初始入渗率; k 为反映土壤特性的常数。

3) Philip 模型^[13]

Philip基于Richards方程的半解析方法提出了Philip模型,模型中两个参数有明确的物理意义。该模型如下:

$$i = 0.5 \times S \times t^{-1/2} + A \quad (4)$$

式中: S 为土壤吸水性参数, A 为饱和导水率。

4) 蒋定生模型^[14]

蒋定生在分析Kostiakov和Horton入渗模型的基础上,结合黄土高原大量的野外测试资料。提出的人渗公式为:

$$f_t = f_c + (f_1 - f_c) / t^a \quad (5)$$

式中: f_t 为 t 时刻的入渗速率; f_1 为第1 min末的入渗速率; f_c 为稳定入渗率。

2 结果与分析

2.1 入渗过程

图1反映的是5°和15°小区上,谷子不同生育期的土壤入渗情况。从图中可知,入渗过程中,不同坡度各生育期的小区上初始入渗率都比较大,随着降雨历时的延长,入渗速率逐渐降低。在大约50 min以后,入渗速率虽有波动,但有接近稳定入渗阶段的趋势。与对照相比,谷子小区上的初始产流时间推

迟,除个别小区外,初始入渗率均大于对照,平均值(1.173 mm/min)较对照(1.063 mm/min)提高了10.3%;以降雨结束前10分钟左右的平均入渗率作为稳定入渗率计算时,谷子小区的平均值(0.524 mm/min)较对照(0.442 mm/min)提高了18.6%;谷子小区的平均入渗率(0.849 mm/min)较对照(0.743 mm/min)提高了14.3%,从而累积入渗量(45.335 mm)较对照(34.878 mm)提高了30.0%,特别在抽穗初期和灌浆初期,谷子小区入渗增加更明显。第三,随着作物的生长,其冠幅也在不断变

化,再加上坡度和地表结皮形成与打破的交替等作用的综合影响,使入渗过程始终处在一个随时间延长而忽高忽低的波动之中,但入渗率随时间变化的过程符合幂函数形式,见表1。其通式为:

$$f = b \cdot t^c \quad (6)$$

式中: b 、 c 为待定常数。

2.2 土壤水分入渗曲线的模型拟合

分别采用 Kostiakov、Horton、Philip 和蒋定生模型对4个坡度与谷子4个生长阶段试验结果进行拟合,结果见表2、表3、表4和表5。

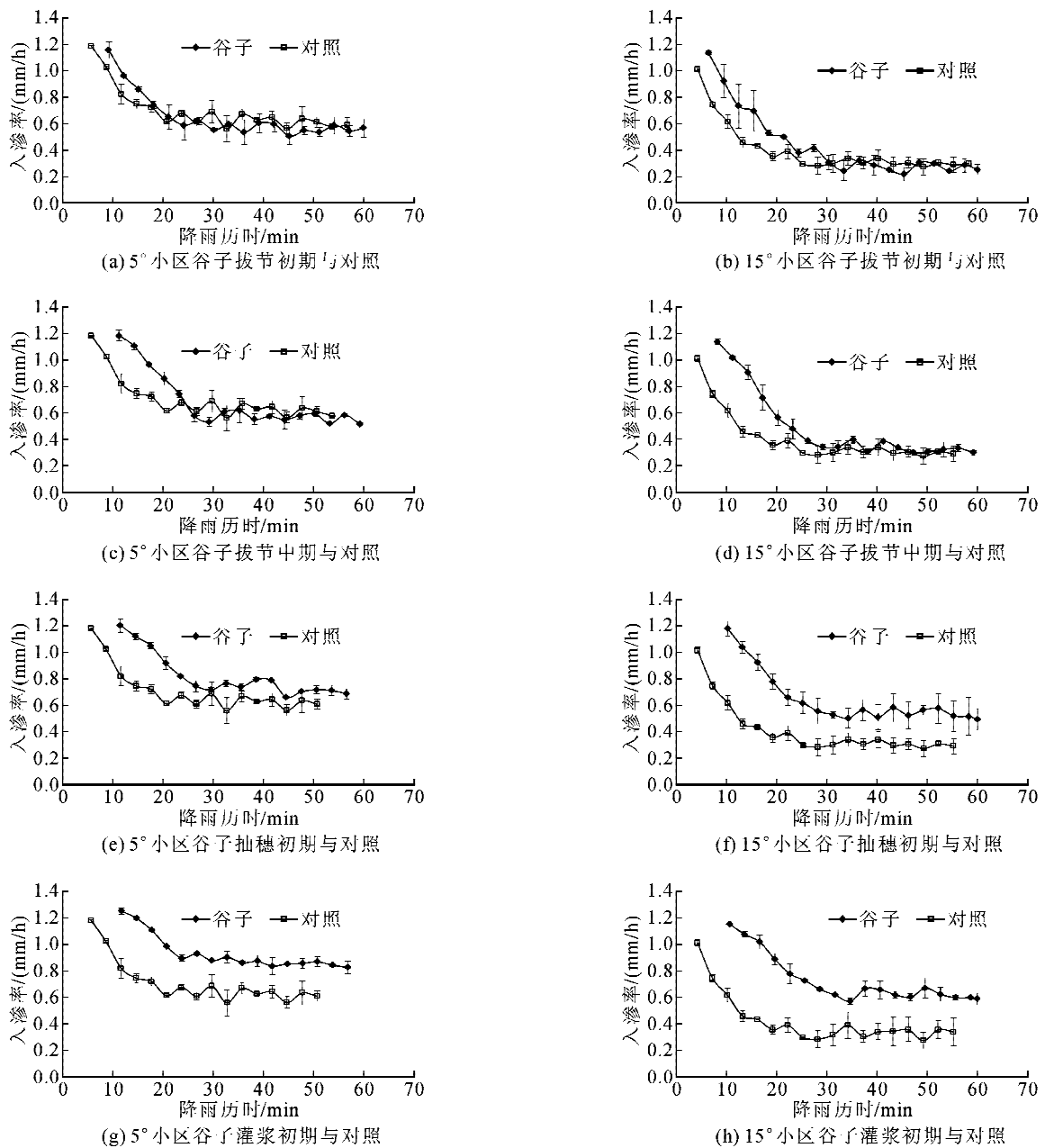


图1 不同生长期各小区在80 mm/h雨强下土壤入渗曲线

Fig. 1 Soil infiltration curve of four growth periods in runoff plots under rainfall of 80 mm/h intensity

表 1 入渗曲线描述式
Tab.1 The general infiltration descriptive formula

生长期	坡度/(°)	谷子			对照		
		<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
拔节初期	3	2.562	-0.385	0.810**	1.655	-0.256	0.833**
	5	3.004	-0.480	0.830**	2.017	-0.352	0.845**
	10	7.182	-0.862	0.906**	2.561	-0.679	0.934**
	15	3.624	-0.666	0.936**	1.798	-0.482	0.866**
拔节中期	3	4.265	-0.549	0.827**	1.671	-0.260	0.830**
	5	4.707	-0.561	0.884**	2.015	-0.351	0.836**
	10	7.644	-0.816	0.916**	2.536	-0.621	0.951**
	15	6.669	-0.819	0.937**	1.897	-0.481	0.856**
抽穗初期	3	4.111	-0.456	0.890**	1.663	-0.231	0.845**
	5	2.490	-0.330	0.794*	2.107	-0.335	0.854**
	10	3.273	-0.442	0.805**	2.315	-0.661	0.915**
	15	4.890	-0.642	0.915**	1.897	-0.481	0.856**
灌浆初期	3	2.469	-0.271	0.762**	1.655	-0.256	0.833**
	5	2.607	-0.303	0.891**	2.017	-0.352	0.845**
	10	3.000	-0.407	0.825**	2.513	-0.616	0.951**
	15	3.295	-0.452	0.892**	1.612	-0.404	0.702*

注: ** *p*<0.01; * *p*<0.05。

表 2 Kostiakov 模型参数拟合及 *R*²
Tab.2 Kostiakov model parameters fitting and *R*²

生长期	坡度/(°)	雨强/(mm/h)	<i>i</i> ₁ /(mm/min)	<i>a</i>	<i>R</i> ²
拔节初期	3	83.4	2.562	0.385	0.810**
	5	78.1	3.004	0.48	0.830**
	10	79.5	7.182	0.862	0.906**
	15	84.2	3.624	0.666	0.936**
拔节中期	3	77.6	4.265	0.549	0.827**
	5	82.6	4.707	0.561	0.884**
	10	77.3	7.644	0.816	0.916**
	15	83.6	6.669	0.819	0.937**
抽穗初期	3	82.1	4.111	0.456	0.890**
	5	78.1	2.49	0.33	0.794*
	10	84.6	3.273	0.442	0.805**
	15	78.4	4.890	0.642	0.915**
灌浆初期	3	83.7	2.637	0.292	0.799**
	5	85.2	2.500	0.289	0.856**
	10	81.7	3.00	0.407	0.825**
	15	84.1	2.839	0.401	0.706*

注: ** *p*<0.01; * *p*<0.05。

表 3 Horton 模型参数拟合及 *R*²
Tab.3 Horton model parameters fitting and *R*²

生长期	坡度/(°)	雨强/(mm/h)	<i>i</i> _c /(mm/min)	<i>i</i> ₀ /(mm/min)	<i>k</i>	<i>R</i> ²
拔节初期	3	83.4	0.607	3.250	0.152	0.952**
	5	78.1	0.493	2.515	0.126	0.919**
	10	79.5	0.178	1.994	0.075	0.947**
	15	84.2	0.313	2.257	0.141	0.956**
拔节中期	3	77.6	—	—	—	—
	5	82.6	—	—	—	—
	10	77.3	—	—	—	—
	15	83.6	0.293	2.569	0.111	0.964**
抽穗初期	3	82.1	—	—	—	—
	5	78.1	—	—	—	—
	10	84.6	—	—	—	—
	15	78.4	—	—	—	—
灌浆初期	3	83.7	—	—	—	—
	5	85.2	—	—	—	—
	10	81.7	—	—	—	—
	15	84.1	—	—	—	—

注: “—”表示拟合无结果; ** *p*<0.01; * *p*<0.05。

由表 2 可知,Kostiakov 模型的拟合结果较好,其关键系数介于 0.706~0.937 之间;而 Horton 模型只能拟合谷子拔节初期 3°~15°和拔节中期 15°的小区试验结果(表 3);Philip 模型也只适用于拔节初期 3°~5°、抽穗初期 3°~10°和灌浆初期 3°~15°的拟合(表 4);蒋定生模型的适用范围更少,只有拔节初期 15°、

拔节中期 10°、15°和灌浆初期 10°等几个小区(表 5)。

Kostiakov 模型虽能较好地模拟谷子全生育的人渗过程,但入渗率估算值偏低。图 2 是用 Kostiakov 模型的预测点拟合为过原点直线,其斜率与 1 的偏差即为预测偏差。通过计算,其平均值为 -10.82%,见表 6。

表 4 Philip 模型参数拟合及 R²
Tab. 4 Philip model parameters fitting and R²

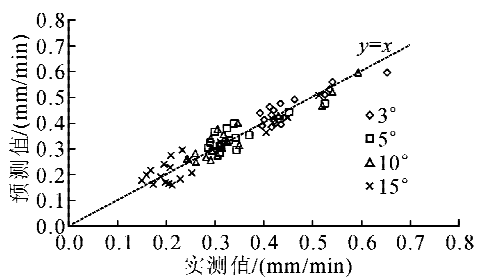
生长期	坡度/ (°)	雨强/ (mm/h)	S/ (mm/min ^{0.5})	A/ (mm/min)	R ²
拔节初期	3	83.4	5.518	0.185	0.831**
	5	78.1	5.933	0.048	0.834**
	10	79.5	—	—	—
	15	84.2	—	—	—
拔节中期	3	77.6	—	—	—
	5	82.6	—	—	—
	10	77.3	—	—	—
	15	83.6	—	—	—
抽穗初期	3	82.1	8.537	0.09	0.894**
	5	78.1	5.629	0.291	0.814**
	10	84.6	6.737	0.113	0.816**
	15	78.4	—	—	—
灌浆初期	3	83.7	6.229	0.403	0.818**
	5	85.2	5.705	0.409	0.880**
	10	81.7	6.498	0.155	0.830**
	15	84.1	6.054	0.171	0.723*

表 5 蒋定生模型参数拟合及 R²
Tab. 5 Jiang Dingsheng model parameters fitting and R²

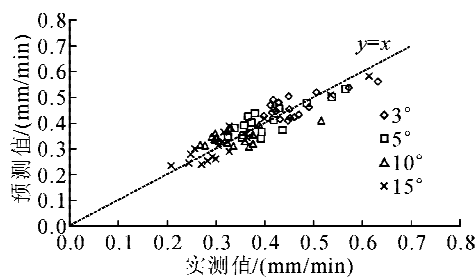
生长期	坡度/ (°)	雨强/ (mm/h)	f _c / (mm/min)	f ₁ / (mm/min)	a	R ²
拔节初期	3	83.4	—	—	—	—
	5	78.1	—	—	—	—
	10	79.5	—	—	—	—
	15	84.2	0.238	9.922	1.279	0.971**
拔节中期	3	77.6	—	—	—	—
	5	82.6	—	—	—	—
	10	77.3	0.004	7.72	0.821	0.916**
	15	83.6	0.142	11.145	1.101	0.944**
抽穗初期	3	82.1	—	—	—	—
	5	78.1	—	—	—	—
	10	84.6	—	—	—	—
	15	78.4	—	—	—	—
灌浆初期	3	83.7	—	—	—	—
	5	85.2	—	—	—	—
	10	81.7	0.425	6.45	0.874	0.839**
	15	84.1	—	—	—	—

注:“—”表示拟合无结果;** p<0.01;* p<0.05。

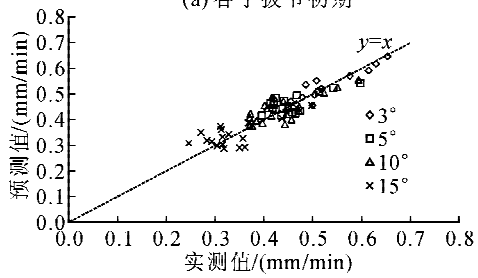
注:“—”表示拟合无结果;** p<0.01;* p<0.05。



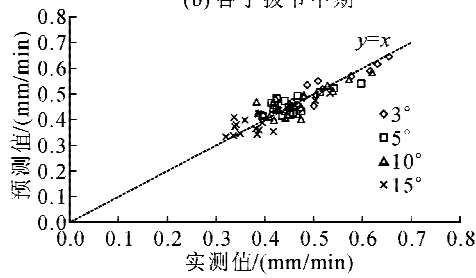
(a) 谷子拔节初期



(b) 谷子拔节中期



(c) 谷子抽穗初期



(d) 谷子灌浆初期

图 2 谷子各生长期入渗率的实测值与 Kostiakov 模型预测值

Fig. 2 Predicted values by Kostiakov Model and measured values in millet growth period

表6 预算偏差

Tab.6 Deviation between measured and predicted values

坡度/ (°)	拔节 初期/%	拔节 中期/%	抽穗 初期/%	灌浆 初期/%	平均 值/%
3	-5.86	-17.61	-3.19	-4.27	-7.73
5	-12.66	-7.87	-8.04	-3.24	-7.95
10	-17.41	-39.47	-11.29	-17.09	-21.32
15	0.95	-1.57	-0.53	-23.95	-6.28
平均值	-8.75	-16.63	-5.76	-12.14	-10.82

3 结 论

1) 在 80 mm/min 降雨强度条件下,谷子坡地的人渗率随历时延长具有一定的波动性,但总体呈下降趋势,符合幂函数规律,与裸地对照相比,其初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和累积入渗量均提高了 10%~30% 不等,从而减少坡面暴雨径流量。

2) 不同作物生育期,谷子坡面的人渗能力不同。从拔节初期到灌浆初期,谷子坡地的人渗能力逐渐增加。这是由于随着作物的生长,叶面积增加,作物对地面的覆盖度增加,在降雨过程中,冠层截留能降低雨滴对土壤结构的破坏,增加入渗率。

3) 模拟证实 Kostiakov 入渗模型可模拟谷子全生育期的入渗特征,但其估算量平均偏低 10% 左右。

参考文献:

- [1] 谢俊奇. 中国坡耕地[M]. 北京: 中国大地出版社, 2005.
- [2] 唐克丽. 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 2-7.
Tang Keli. Characteristics and perspectives on scientific discipline of soil erosion and soil and water conservation in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1999, 6(2): 2-7.
- [3] 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.
Tang Keli, Zhang Keli, Lei Alin. Research on the maximum slope for farmland returning at loess hilly-gully region[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(2): 200-203.
- [4] 李振永, 杨文平. 半干旱退化山区不同土地利用方式土壤入渗性能的研究[J]. 现代农业科技, 2009, 24: 260-266.
Li Zhenyong, Yang Wenping. Soil infiltration of land use patterns in semi-arid degraded mountainous areas[J].

Modern Agricultural Science and Technology, 2009, 24: 260-266.

- [5] 袁建平, 蒋定生, 文妙霞. 坡地土壤降雨入渗试验装置研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(1): 24-27, 42.
Yuan Jianping, Jiang Dingsheng, Wen Miaoxia. Research on rainfall penetration testing device of slopeland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(1): 24-27, 42.
- [6] 李王成, 黄修桥, 龚时宏, 等. 玉米冠层对喷灌水量空间分布的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 59-62.
Li Wangcheng, Huang Xiuqiao, Gong Shihong, et al. Space distribution of sprinkler water under maize canopies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(3): 59-62.
- [7] 马波, 吴发启, 马璠, 等. 玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 118-123.
Ma Bo, Wu Faqi, Ma Fan, et al. Characteristic and model building of stemflow of corn plant in different growth stages[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 118-123.
- [8] 马波, 吴发启, 马璠, 等. 叶面积和降雨强度对大豆茎秆流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 58-62.
Ma Bo, Wu Faqi, Ma Fan, et al. Effect of leaf area and rainfall intensity on the stemflow of Glycine max[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6): 58-62.
- [9] 杨陵区地方志编撰委员会. 杨陵区志[M]. 西安: 西安地图出版社, 2004.
- [10] 水利电力部农林水利水土保持局[S]. SD238-87 水土保持技术规范. 北京: 水利电力出版社, 1998.
- [11] Cahoon J. Kostiakov infiltration parameters from kinematic wave model[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124(2): 127-130.
- [12] Mailhol J. Validation of a predictive form of Horton infiltration for simulating furrow irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(6): 412-421.
- [13] Haghghi F, Gorji M, Shorafa M, et al. Evaluation of some infiltration models and hydraulic parameters [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2010, 8(1): 210-217.
- [14] 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原土壤入渗速率的研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 299-304.
Jiang Dingsheng, Huang Guojun. Study on the infiltration rate of soils on the Loess Plateau of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(4): 299-304.

(责任编辑 周蓓)