

# 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤入渗规律研究

赵鹏宇<sup>1,2</sup>, 徐学选<sup>1,2</sup>, 刘普灵<sup>1,2</sup>, 陈天林<sup>3</sup>, 廖鑫<sup>1</sup>, 李波<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 在延安燕沟试验区建立不同下垫面(草地、刈割草地、翻耕草地、灌木地、刈割灌木地、翻耕灌木地)小区, 分析了 30 场人工模拟降雨试验的入渗资料, 结果表明, 植被覆盖地平均入渗率是刈割地的 1.2 倍, 是翻耕地的 2.0 倍; 在地表坡度 7°, 草灌地土壤容重分别为 1.27 和 0.99 g/cm<sup>3</sup> 条件下, 坡面平均入渗率与降雨强度具有极显著的抛物线函数关系。草地、刈割草地、灌木地、刈割灌木地雨强分别达到 1.62, 2.21, 2.49 和 1.71 mm/min 时, 平均入渗率具有最大值, 分别为 1.17, 0.97, 1.67 和 1.51 mm/min; 但翻耕草地、翻耕灌木地与此相反, 雨强分别达到 1.36 和 1.68 mm/min 时, 平均入渗率具有最小值, 分别为 0.379 和 0.382 mm/min; Horton 入渗公式能较好地模拟不同土地利用方式下降雨的入渗过程。

**关键词:** 黄土丘陵区; 土地利用; 模拟降雨; 入渗速率; 入渗模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)01-0040-05

中图分类号: S157.1

## Infiltration Characteristics Under Different Land Uses in the Loess Hilly Area

ZHAO Peng-yu<sup>1,2</sup>, XU Xue-xuan<sup>1,2</sup>, LIU Pu-ling<sup>1,2</sup>, CHEN Tian-lin<sup>3</sup>, LIAO Xin<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation Science in Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730021, China)

**Abstract:** Six plots (grass slope, grass-cut slope, plowed grass slope, shrubby slope, shrub-cut slope, and plowed shrubby slope) in the Yan 'gou watershed were constructed and infiltration data for thirty simulated rainfall events were analyzed. Results showed that the average infiltration rate on vegetable slope was 1.2 times greater than that on shrub-cut slope and 2.0 times greater than that on plowed slope. For the soil bulk density of 1.27 or 0.99 g/cm<sup>3</sup> on grass slope or shrubby slope, the average infiltration rate varied with rainfall intensity as a parabolic function at a slope of 7 degree. When rainfall intensities for grass slope, grass-cut slope, shrubby slope, and shrub-cut slope were 1.62, 2.21, 2.49, and 1.71 mm/min, the maximum averaged infiltration rates were 1.17, 0.97, 1.67, and 1.51 mm/min, respectively. In contrast, when rainfall intensities for plowed grass slope and plowed shrubby slope were 1.36 and 1.68 mm/min, the minimum averaged infiltration rates were 0.379 and 0.382 mm/min, respectively. In conclusion, the Horton's model better simulates the infiltration process under the condition of the different land uses.

**Keywords:** loess hilly area; land use; simulated rainfall; infiltration rate; infiltration model

近年来黄土高原大规模的植被恢复使得土地利用方式发生很大变化, 围绕土地利用对坡面降雨入渗的影响, 国内外众多学者做了大量的相关研究。李裕元<sup>[1]</sup>对黄绵土室内降雨入渗的研究表明, 平均入渗率与降雨强度具有极显著的抛物线函数关系; 陈洪松<sup>[2]</sup>通过野外模拟降雨试验研究表明, 裸地形成地表结皮

后, 平均入渗率降低; Egle, Moore<sup>[3]</sup>的研究表明, 土壤结皮对裸地入渗的影响大大超过其它因素的影响, 其减少入渗量可达 80% 左右; 王健<sup>[4]</sup>在延安采用双环法进行水分入渗试验表明, 平均入渗速率表现为留茬农地 > 耕地 > 荒草地 > 田间道路; 高鹏<sup>[5]</sup>在延安燕沟降雨试验表明, 林灌地和封禁草灌地土壤入渗速率

收稿日期: 2008-07-10

修回日期: 2008-09-27

资助项目: 国家 973 课题“水土流失环境效应评价理论与指标体系”(2007CB407205); 中科院知识创新工程西部项目“黄土高原水土保持与可持续生态建设试验示范研究”(KZCX2-XB2-05)

作者简介: 赵鹏宇(1981—), 男(汉族), 山西省保德县人, 硕士研究生, 主要从事生态水文与水土保持方面研究, E-mail: zhaopengyu2452@yahoo.com.cn。

通信作者: 徐学选(1966—), 男(汉族), 陕西省大荔县人, 博士, 研究员, 主要从事土壤水分生态、生态水文方面研究。E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn。

差异不明显,而与裸露农地之间的差异显著;吴发启、赵西宁<sup>[6,7]</sup>对黄土区坡耕地土壤入渗试验表明,随雨强增加,土壤稳渗速率增加;李毅<sup>[8]</sup>通过室内模拟降雨表明,雨强越大,人工草地初始和稳定入渗率越大。这类研究从降雨强度角度为着眼点,对植被改善土壤结构,增加入渗作用的生态效益提出了科学依据。随着黄土高原的植被恢复,土地结构发生很大变化,为此在延安燕沟流域开展野外人工降雨模拟试验,通过不同土地利用下降雨入渗对比来揭示植被恢复与破坏产生的影响。进而为土壤水分及水土保持效益评估提供科学依据。

## 1 研究区概况

燕沟流域位于延安市南 3 km 处,东经 109°20'00" — 109°35'00", 北纬 36°20'00" — 36°32'00", 属黄土高原丘陵沟壑区第 1 副区。流域处于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡带,多年平均降水量为 572 mm,年最大降水量 871.2 mm,年最小降水量为 330 mm。降雨时空分布不均,57%的降雨集中于夏季 6—9 月,特别是 7—8 月,多以暴雨形式出现,通过暴雨频率计算,延安燕沟流域 10 年一遇 24 h 暴雨量为 110 mm,20 年一遇 24 h 暴雨量为 130 mm。天然

植被以灌丛和草被为主,多分布于沟坡。土壤以侵蚀性黄绵土为主,占 90% 以上,土壤肥力较低。

## 2 试验设计与方法

### 2.1 试验装置

试验采用中国科学院水利部水土保持研究所研制的组合侧喷式野外人工模拟降雨装置,两侧座架之间距离为 6 m,喷头高 6 m,喷头上出水高度 1.5 m,降雨雨滴终点速度近似达到天然降雨的速度<sup>[9]</sup>。供水压力由进水阀门控制,雨强通过出水孔的直径来调节。

### 2.2 试验设计和处理

依据地形与地面植被状况,在流域内选择有代表性的坡地布设小区(表 1),坡度为 7°,退耕年限为 10 a,小区面积为 5 m<sup>2</sup> (1 m × 5 m),小区四周由长 100 cm,宽 30 cm,厚 0.2 cm 的铁皮围成,铁皮插入土壤深度为 25 cm,以消除侧向入渗的影响。坡向 90°E。草地小区盖度为 70%,主要植被为铁杆蒿 (*Compositae*)、针茅 (*Stipa capillata* Linn)、冰草 (*Agropyron cristatum* Linn.)。灌木小区盖度为 75%,主要植被为柠条 (*Caragana Korshinskii* Kom)、杠柳 (*Periploca sepium* Bunge)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.) 等。

表 1 径流小区土壤性质

小区类型	0—30 cm 初始含水率/ (g · g <sup>-1</sup> )	0—5 cm 容重/(g · cm <sup>-3</sup> )			土壤质地
		原状	刈割	翻耕	
草地	16.7 ~ 18.5	1.27	1.27	0.99	粉质壤土
灌木	18.2 ~ 19.5	0.99	0.99	0.95	

试验采取保持原状、刈割(完全去除地上部分与枯落物)和翻耕(剪草后用铲子模拟耕种进行翻耕,深度 15~20 cm 左右,根被铲断)3 种处理。采用 5 种雨强分别为 0.94, 1.23, 1.48, 1.72 和 2.22 mm/min,符合黄土高原天然降雨主要雨强范围<sup>[7-8]</sup>,共进行 30 次降雨。降雨历时为 30~60 min,依据产流时间稍作调整。每次人工模拟降雨试验前,用烘干法测定试验小区表层土壤 0—30 cm 的每 10 cm 各土层土壤含水量,采取 1~2 d 自然风干方法,保证小区土壤含水量范围。同时测定小区土壤容重。记录降雨开始、产流开始、降雨停止及径流停止时间。采集所有水沙样,时间间隔为 5 min。在小区周围布设 4 个雨量筒,量测降雨量。

### 2.3 入渗率计算

入渗率计算以水量平衡为基础,即

$$P = R + I + E + V + D$$

式中:  $P$ ——降雨量;  $R$ ——径流量;  $I$ ——入渗量;  $E$ ——蒸发量;  $V$ ——植物截留量;  $D$ ——洼地蓄水量。实验过程中,由于时间短,蒸发量很小,可以不计。本实验中的洼地蓄水对入渗率影响较小,所以  $E, D$  都可以忽略。得出:

$$I = P - R - V$$

又根据:  $i = dI/dt$   $I // t$ ,由一定时间的降雨量  $P$ ,径流量  $R$  和截流量  $V$  就可以算出入渗率  $i$ 。植被截流量通过浸水称重法得到:原状草地中  $V = 2.85 L$ ,原状灌木地中  $V = 1.89 L$ 。原状处理和刈割处理的入渗差别,即可验证植被的截留作用。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用方式对入渗率的影响

图 1 为 1.72 mm/min 模拟降雨强度下分析不同土地利用的入渗率变化过程,从图中可以看出,随着

降雨历时的增加,入渗率逐渐下降。不同处理对入渗率的影响具有差异性。灌木地平均入渗率(1.66 mm/min)较草地(1.30 mm/min)、刈割草地(0.96 mm/min)、翻耕草地(0.68 mm/min)分别高 1.3, 1.7, 2.5 倍,这是由于灌木地各处理的土壤容重均小于草地各处理(表 1),灌木地略大于刈割灌木地(1.62 mm/min)和植被截流有关,从平均入渗率可以看出其作用并不明显(草地与刈割草地较明显)。翻耕地平均入渗率(0.68~0.80 mm/min)较低且动态变化比较复杂,原因在于翻耕后土壤空隙结构被破

坏,雨滴的冲击封实了土壤毛细孔管,从而阻碍了水分的正常入渗。而刈割地入渗率小于植被覆盖地是由于它与植被覆盖地相比缺少枝叶截流作用,与翻耕地相比它依然维持着良好空隙结构,土壤入渗率仍然保持在较高水平。

植被覆盖地平均入渗率是刈割地的 1.2 倍,是翻耕地的 2.0 倍。说明草灌植被在改善土壤孔隙,增强土壤的入渗能力中起到关键作用,而且土壤结构因素的增渗作用大于植被截流作用,黄土高原植被恢复后灌木地对入渗的调节作用大于草地。

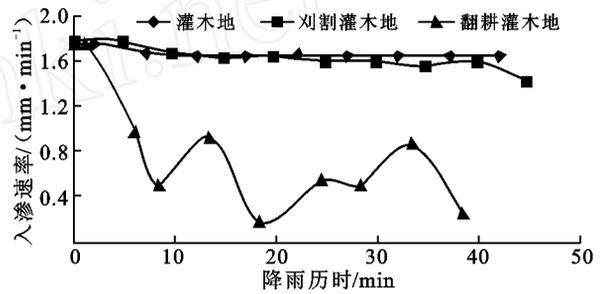
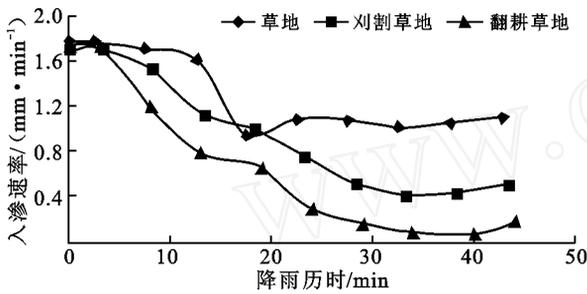


图 1 不同处理小区入渗率动态变化过程

3.2 降雨强度对平均入渗率的影响

土壤平均入渗率是指一次降雨过程中(包括产流前)单位时间降雨的入渗量。在相近土壤水分下(草地、灌木地前期含水量分别为 16.7, 18.3 g/g),在试验雨强范围(0.94~2.22 mm/min)与相同的降雨历时(40 min 左右)条件下,草地、刈割草地、灌木地、刈割灌木地平均入渗率  $i$  随雨强  $I$  的增大呈明显的增大趋势,但在增大到一定值时  $i$  达到最大,然后随着雨强的进一步增大  $i$  呈下降趋势。这一现象(图 2)表明,在一次降雨过程中土壤有一个最大入渗能力,当雨强增大到土壤最大入渗能力时,应达到最大并逐渐趋于稳定,但是由于雨强增大以后雨滴对地表土

壤的冲击力增大,地表形成了更为坚实的结皮层,从而阻碍了降雨入渗,因此随着雨强的进一步增大出现下降趋势。这与杨晓俊<sup>[10]</sup>、李裕元<sup>[1]</sup>应用人工模拟降雨对黄绵土入渗率研究的结论相一致,但其并未给出雨强对翻耕地入渗率的影响,试验中翻耕地表现出相反的规律,即  $i$  随雨强先减小后增大的趋势,在  $I$  增大到一定值时存在一个最小的  $i$ ,开始随雨强减小是由于翻耕地在大雨强作用下,破坏了土壤毛细孔管,加上雨滴的冲击封实,从而阻碍了水分的正常入渗,但是随着雨强的增大,翻耕地地面糙度较大,出现部分添凹后的有压入渗,  $i$  随雨强增加又出现了增大的趋势。

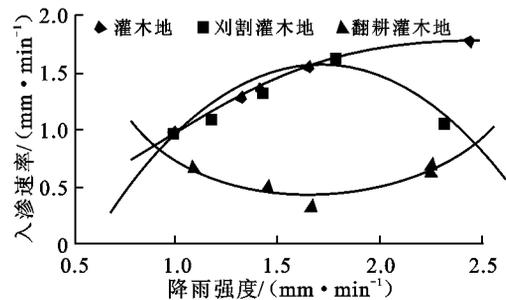
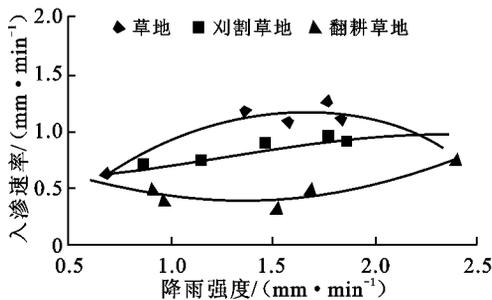


图 2 不同处理小区平均入渗率与降雨强度的关系

回归分析表明  $i$  和  $I$  具有极显著的抛物线函数关系(表 2),显然,当土壤的初始含水量、质地、容重、坡度等地表条件一定的情况下,存在一个临界雨强,对于草地、刈割草地、灌木地、刈割灌木地,当  $I$  达到

临界雨强时具有最大的平均入渗率。对于翻耕草灌木地具有最小的平均入渗率。因此计算可得,在该试验条件下,草地、刈割草地、灌木地、刈割灌木地临界雨强分别为 1.62, 2.21, 2.49 和 1.71 mm/min 时,平均

入渗率最大值分别为 1.17, 0.97, 1.67 和 1.51 mm/min; 1.68 mm/min 时, 平均入渗率最小值分别为 0.379, 0.382 mm/min; 翻耕草地、翻耕灌木地临界雨强分别为 1.36, 0.382 mm/min。

表 2 不同处理小区平均入渗率与降雨强度的相关方程

小区类型	处理	回归方程	相关系数
草地	原状	$i = -0.630I^2 + 2.043I - 0.483$	$R^2 = 0.9187$
	刈割	$i = -0.146I^2 + 0.646I + 0.254$	$R^2 = 0.9098$
	翻耕	$i = 0.349I^2 + 0.949I + 1.025$	$R^2 = 0.8786$
灌木地	原状	$i = -0.353I^2 + 1.760I + 0.423$	$R^2 = 0.9978$
	刈割	$i = -1.176I^2 + 4.038I - 1.933$	$R^2 = 0.8777$
	翻耕	$i = -0.849I^2 + 2.85I - 2.775$	$R^2 = 0.9107$

注:  $i$  为平均入渗速率(mm/min);  $I$  为降雨强度(mm/min)。可信度均达极显著水平。

3.3 土壤水分入渗数学模型拟合

土壤水分入渗的数学模型(公式)有许多种,包括理论的、经验的、半理论半经验的,其适用条件各异。根据本次试验的具体情况,选择人工模拟降雨试验入渗过程数据较为完整可靠的 18 组资料,用以下 3 种入渗公式对其进行回归分析(表 3)

(1) Kostialov 入渗公式<sup>[11]</sup>

$$f(t) = mt^{-n}$$

式中:  $f(t)$  ——土壤入渗速率(mm/min);  $t$  ——入

渗时间(min);  $m, n$  ——参数。

(2) Horton 入渗公式<sup>[12]</sup>

$$f(t) = i + (I - i)e^{-kt}$$

式中:  $i$  ——稳渗速率(mm/min);  $I, k$  ——参数; 其余符号意义同前。

(3) Philip 入渗公式<sup>[13]</sup>

$$f = r + 0.5st^{-0.5}$$

式中:  $t$  ——产流历时(min);  $r$  ——为稳渗速率(mm/min);  $s$  ——为参数。

表 3 3 种入渗公式中参数的回归结果

小区类型	雨强/ (mm·min <sup>-1</sup> )	Kostiakov 入渗公式			Horton 入渗公式				Philip 入渗公式		
		$m$	$n$	$R$	$i$	$I$	$k$	$R$	$r$	$s$	$R$
	1.36	2.146	0.199	0.980	0.970	1.499	0.052	0.952	0.725	3.989	0.850
	1.77	2.241	0.203	0.639	1.034	2.085	0.093	0.707	0.829	3.358	0.610
	1.84	2.171	0.241	0.797	0.392	1.917	0.037	0.914	0.678	3.239	0.718
	1.14	1.649	0.266	0.782	0.586	1.389	0.085	0.831	0.397	2.989	0.759
	1.70	3.091	0.454	0.843	0.307	2.488	0.072	0.976	0.117	6.524	0.821
	1.85	2.003	0.256	0.693	0.861	2.293	0.217	0.815	0.577	3.097	0.732
	0.91	2.977	0.614	0.601	0.328	1.905	0.135	0.678	0.180	5.266	0.680
	1.69	3.586	0.701	0.838	0.391	2.814	0.192	0.849	0.199	6.531	0.774
	2.40	4.060	0.509	0.828	0.511	3.321	0.054	0.932	0.134	8.365	0.850
	1.31	1.323	0.012	0.704	1.272	1.449	0.444	0.925	1.250	0.217	0.832
	1.41	1.399	0.013	0.639	1.341	1.462	0.551	0.839	1.322	0.166	0.775
	2.44	2.414	0.018	0.725	2.283	2.617	0.569	0.992	2.235	0.450	0.896
	1.16	1.411	0.080	0.769	0.847	1.191	0.082	0.771	0.913	1.769	0.758
	1.77	1.985	0.070	0.784	1.572	1.891	0.103	0.918	1.469	1.320	0.926
	2.31	3.108	0.502	0.956	1.398	2.741	0.119	0.992	1.421	2.552	0.957
	1.08	2.005	0.393	0.891	0.160	1.269	0.040	0.978	0.144	4.154	0.872
	1.66	1.684	0.610	0.964	0.154	1.935	0.179	0.969	0.166	3.726	0.973
	2.25	3.486	0.549	0.718	0.190	2.501	0.057	0.835	0.211	7.552	0.733

注: 草地; 刈割草地; 翻耕草地; 灌木地; 刈割灌木地; 翻耕灌木地;  $R$  相关系数。

由表 3 可知, Kostiakov 入渗公式参数  $m$  变化范围在 1.323~4.060 之间, 最小值出现在灌木地上, 最大值出现在翻耕草地上,  $n$  变化在 0.012~0.701 之间,  $m$  值越大, 入渗速率随时间减小越快, 可以看出翻耕草地入渗率减小最快, 灌木地减小最慢; 在 Horton 入渗公式中,  $i$  变化在 0.154~2.283 之间, 其中最小值出现在翻耕灌木地, 最大值出现在灌木地; 在 Philip 公式中  $r$  变化在 0.114~2.235 之间, 同样最小值出现在翻耕灌木地, 最大值出现在灌木地,  $s$  值变化在 0.166~8.365 之间,  $s$  值越大, 入渗速率随时间减小越快, 可以看出翻耕草地入渗率减小最快, 灌木地减小最慢。

王健<sup>[4]</sup>的研究表明, Horton 公式可以较好模拟留茬农地、耕地、荒草地、田间道路水分入渗过程, 吴长文等<sup>[14]</sup>也表明 Horton 比 Philip 和 Kostiakov 公式能更好地拟合不同林分入渗, 但均是以有压点源入渗的双环法为基础。

而且赵西宁<sup>[6]</sup>研究表明 Horton 和 Kostiakov 公式不能反映坡耕地土壤入渗实际情况, 高鹏<sup>[5]</sup>研究表明这 3 类公式均能较好地模拟林灌地、封禁草灌地、裸露农地土壤入渗过程, 均是以无压面源入渗的人工降雨法为基础。由于研究方法及对象的不同得出差异很大, 人工降雨法试验时不受地形、坡度等条件限制, 可以较为真实地反映土壤侵蚀过程中的水分入渗变化<sup>[15]</sup>。

本试验中采用 3 类公式都能较好地模拟降雨向土壤中入渗过程, 从相关系数  $R$  的大小, 可以判断 Horton 比 Philip 和 Kostiakov 公式拟合效果更好。说明该公式能较好地模拟不同土地利用方式下降雨入渗过程。

## 4 结论

(1) 黄土丘陵区土地利用方式对入渗速率的影响具有明显的差异性, 植被覆盖地平均入渗率是刈割地的 1.2 倍, 是翻耕地的 2.0 倍。说明草灌植被改善了土壤结构之后起着明显的增渗作用, 且灌木地对土壤入渗的调节作用大于草地的调节作用。

(2) 在地表坡度与土壤状况相对一致的情况下, 坡面平均入渗率  $i$  与降雨强度  $I$  具有极显著的抛物线函数关系, 草地、刈割草地、灌木地、刈割灌木地临界雨强分别为 1.62, 2.21, 2.49 和 1.71 mm/min 时, 具有最大平均入渗率分别为 1.17, 0.97, 1.67 和 1.51 mm/min; 但翻耕草地、翻耕灌木地与此相反, 临

界雨强分别为 1.36, 1.68 mm/min 时, 具有最小平均入渗率分别为 0.379, 0.382 mm/min。

(3) 利用 Kostiakov, Horton 和 Philip 入渗公式对不同土地利用方式降雨实测入渗资料进行回归分析得出, Horton 入渗公式比 Philip 和 Kostiakov 公式拟合效果更好。能较好地模拟不同土地利用方式下降雨入渗的过程。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李裕元, 邵明安. 降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(4): 1-7.
- [2] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 5-8.
- [3] Egle J D, Moore I D. Effect of rainfall energy on infiltration into a bare soil [J]. Jrans of Asae, 1983, 26(6): 189-199.
- [4] 王健, 吴发启, 孟秦倩, 等. 不同利用类型土壤水分下渗特征试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 159-162.
- [5] 高鹏, 穆兴民, 刘普灵, 等. 降雨强度对黄土区不同土地利用类型入渗影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 1-5.
- [6] 赵西宁, 吴发启, 王万忠. 黄土高原沟壑区坡耕地土壤入渗规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(4): 109-112.
- [7] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16-18.
- [8] 李毅, 邵明安. 人工草地覆盖条件下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.
- [9] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工降雨装置[J]. 水土保持通报, 1984, 4(5): 43-47.
- [10] 杨晓俊. 用人工降雨揭示降雨产流特征和降雨入渗规律[J]. 地下水, 2007, 29(3): 18-20.
- [11] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [J]. soil Sci, 1932, 97(1): 17-21.
- [12] Horton R E. An approach to ward a physical interpretation of in filtration-capacity [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1940, 5(3): 399-417.
- [13] Philip J R. The theory of infiltration about captivity and algebraic infiltration equations [J]. Soil Sci. , 1957, 84(4): 257-264.
- [14] 吴长文, 王礼先. 林地土壤的入渗及其模拟分析[J]. 水土保持研究, 1995, 2(1): 71-75.
- [15] 穆兴民, 徐学选, 陈霖巍, 等. 黄土高原生态水文研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 49-55.