

文章编号: 0559-9350 (2004) 04-0048-06

降雨条件下坡地水分转化特征实验研究

李裕元^{1,2}, 邵明安^{1,2}

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中科院 水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 坡地水分转化规律研究对于探讨坡地水土流失以及坡地养分迁移规律具有重要意义。本文以黄绵土为试验材料, 通过模拟降雨试验, 研究了不同雨强条件下坡面入渗过程与产流特征。结果表明: (1) 在地表坡度 15°、土壤容重 1.28~1.30g/cm³ 的条件下, 坡面平均入渗率 (i_a) 与降雨强度 (i_R) 具有极显著的抛物线函数关系, 当 $i_R = 1.35\text{mm/min}$ 时, i_a 具有最大值 (1.01mm/min); 初始产流时间 (t_p) 随 i_R 的增大而减小, 二者呈幂函数关系。(2) 坡面产流以后, 入渗率 (i) 随降雨历时 (t) 呈幂函数形式降低, 坡面产流强度 (V_R) 随 t 的延长呈对数函数形式增加。(3) 随着雨强的增大降雨的入渗量略有增加, 但降雨向土壤水分的转化率则显著降低。

关键词: 降雨实验; 入渗率; 降雨强度; 坡地; 土壤水分转化

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

土壤水分转化是联接大气水、地表水以及地下水的重要环节, 很久以来许多研究者从不同角度对此进行了大量的实验研究, 并取得了许多重要成果^[1~9]。近年来由于全球性生态环境恶化、有效水资源短缺等问题的日渐突出, 坡地水分转化问题又逐渐成为土壤学、水文学、生态学等众多研究领域共同关注的热点^[10~18]。对于坡地来讲, 降雨既是维持植物生长的主要水分来源, 同时也是土壤侵蚀与坡地养分迁移的动力所在, 研究坡地水分转化问题, 对于探讨坡地水土流失以及养分迁移规律也具有重要意义。

水分转化模型历来就存在着参数的确定、修正与普适化的问题^[8,9,12,13]。在本文中作者通过模拟降雨试验, 利用实测降雨径流资料, 采用反推法求算坡面降雨入渗率, 研究了不同雨强条件下坡面降雨的入渗过程与坡地产流特征。

1 材料与方 法

1.1 仪器设备与试验条件 模拟降雨试验于 2000 年 6~10 月在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行, 采用侧喷式自动模拟降雨系统, 喷头高度 16m, 雨滴降落终速根据有关公式^[19] 计算可达到自然雨滴降落终速的 98% 以上, 降雨特性接近于天然降雨^[20]。装土槽采用移动变坡式钢槽, 规格为: 长 × 宽 × 深 = 5.0m × 0.5m × 0.5m, 并排 2 个 (2 次重复), 下端设集流装置, 可定时采集径流样。地表坡度设定为 15°, 设定 6 个降雨强度水平, 均为恒雨强过程, 实测平均雨强值依次为: 0.77 (2 次)、1.05 (4 次)、1.23 (4 次)、1.29 (3 次)、1.37 (1 次) 和 1.48mm/min (2 次), 共计 16 场次降雨, 降雨历时一般为 60min 左右, 少数为 85~90min。

收稿日期: 2002-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371074); 国家杰出青年基金 (40025106); 国家自然科学基金重大项目 (90102012) 共同资助

作者简介: 李裕元 (1965-), 男, 河南博爱人, 博士, 主要从事土壤物理学与环境生态学研究。

1.2 供试材料 试验所用土壤为黄绵土，采自黄土高原水土流失最为严重的地区之一——陕西省安塞县，质地为粉质壤土。供试土壤经风干以后过 2cm 筛，除去砂礓、石块、植物根茬等杂物，备用。土壤装槽以前用喷雾器喷入水分并混匀，土壤初始含水量均控制在 7% 左右（约占田间持水量的 40%^[9]），以便于土壤容重的控制。土壤的装槽容重为 1.28~1.30g/cm³。为避免坡面产流过程中径流侧向流失，土槽实际装土深度为 40cm。观察结果表明，在试验雨强条件下，60min 历时降雨入渗深度一般在 20cm 左右，90min 历时降雨入渗深度一般在 25~30cm 左右，表明装土深度不限制降雨向土壤水分的转化。供试土壤的基础理化性状见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状

土壤类型	土层/cm	有机质 (%)	pH 值	容重/ (g/cm ³)	饱和持水量 (%)	机械组成 (%)			质地
						2mm~50μm	50~2μm	<2μm	
黄绵土	0~20	0.413	8.47	1.28~	39.4	23.9	58.0	18.2	粉质壤土
	20~40	0.386	8.35	1.30	39.0				

1.3 测定内容与计算方法 从坡面产流开始定时采集径流样，时间间隔为 2~5min，记录径流体积与含沙量，并由此计算出产流强度 (V_R) 和入渗率 (i)，计算方法见式 (1、2)。本文中，坡面平均入渗率 (i_a) 定义为：次降雨过程中（包括产流前）坡面单位时间降雨的入渗量，量纲为 mm/min，即 t 等于总降雨历时时的入渗率 i 。

$$V_R = 10 R_u / (St) \quad (1)$$

式中： V_R 为产流强度 (mm/min)； R_u 为径流量 (mL)； S 为坡面受雨面积 (cm²)； t 为降雨历时 (min)；10 为量纲换算系数。

$$i = i_R \cos \alpha - V_R \quad (2)$$

式中： i 为入渗率 (mm/min)； i_R 为降雨强度 (mm/min)； α 为地表坡度；其余符号同前。

2 结果与分析

2.1 坡面平均入渗率与坡面产流特征 试验结果表明，在地表坡度与土壤状况相对一致的情况下，在试验雨强范围内 (0.7~1.5mm/min) 与相同的降雨历时 (60min 左右) 条件下，坡面平均入渗率 i_a 随着雨强 i_R 的增大呈明显的增大趋势，但在 i_R 增大到 1.3mm/min 左右时 i_a 达到最大，然后随着雨强的进一步增大 i_a 略呈下降趋势。这一现象表明，在一次降雨过程中坡地土壤有一个最大入渗能力（相当于初始降雨或灌水阶段土壤的入渗性能^[1]），当降雨强度小于该入渗能力时， i_a 随着雨强的增大而增大，当雨强增大到坡面最大入渗能力时， i_a 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，地表形成了更为紧实的结皮层，从而阻碍了降雨入渗，因此随着雨强的进一步增大 i_a 有下降趋势。回归分析表明， i_a 与 i_R 具有极显著的抛物线函数关系（见图 1），相应的回归方程和相关系数如下

$$i_a = -1.3302 i_R^2 + 3.5926 i_R - 1.418, R^2 = 0.7881^{**} \quad (3)$$

显然，由式 (3) 可以看出，当令 $i_a = 0$ 时，可以求得最大 i_a 值，即当土壤的初始含水量、质地、容重、导水率、地表坡度等土壤与地形条件一定的情况下，存在一个临界雨强，当 i_R 等于临界雨强时 i_a 具有最大值；当 i_R 小于临界值时， i_a 随着 i_R 的增大而增大，反之则减小。

由式 (3) 计算可得，在本试验条件下临界雨强为 1.35mm/min，最大坡面平均入渗率为 1.01mm/min。

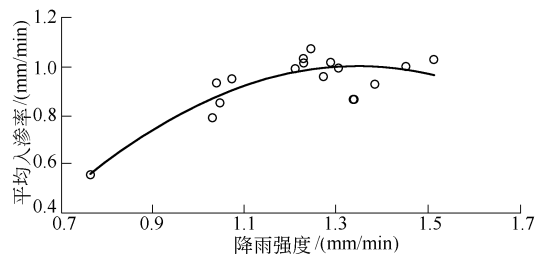


图 1 模拟降雨条件下坡面平均入渗率随降雨强度的变化

试验结果表明, 在本试验条件下 (雨强 0.7~1.5mm/min、降雨历时 60min 左右), 坡地初始产流时间 t_p 、平均径流深 D 、径流系数 C_R (径流深与降雨量的比率) 等坡面产流特征和雨强具有显著的相关关系 (见图 2), 其中, 初始产流时间随雨强的增大而减小, 二者呈幂函数关系, 这与在人工草地上所做模拟降雨试验的结论相一致^[21]; 坡面径流深与径流系数也随雨强的增大而增大, 表现为线性函数关系。相应的回归方程与相关系数见式 (4) ~ 式 (6)。

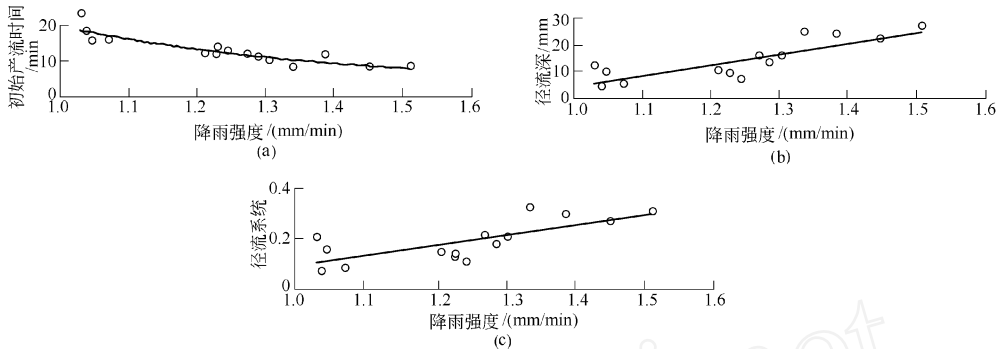


图 2 模拟降雨条件下坡面初始产流时间 (t_p)、径流深 (D , mm) 与径流系数 (C_R) 随雨强的变化

$$t_p = 19.968 i_R^{-2.1161}, R^2 = 0.8243^{**} \quad (4)$$

$$D = 42.132 i_R - 38.184, R^2 = 0.7048^{**} \quad (5)$$

$$C_R = 0.4144 i_R - 0.3256, R^2 = 0.5577^{**} \quad (6)$$

式中: t_p 为初始产流时间 (min); D 为坡面平均径流深 (mm), C_R 为径流系数, i_R 为降雨强度 (mm/min), R 为相关系数。

可见, 随着雨强的增大坡面初始产流时间缩短, 在降雨量或者降雨时间相同的情况下, 坡面产流时间相对延长, 因而坡面的产流量与产流系数增大, 而降雨向土壤的入渗补给率降低, 降雨向土壤水分的转化减少。在黄土高原地区, 由于暴雨发生频率相对较高, 不仅造成严重的土壤侵蚀^[22], 暴雨条件下土壤水分转化率的降低也是造成该地区水资源短缺的重要原因。目前采取退耕还林还草措施、增加坡面植被覆盖率, 是延长坡面初始产流时间、增加坡面降雨入渗的有效途径, 因而也是减少水土流失、改善当地脆弱生态环境的得力措施。

2.2 入渗率与产流强度的动态变化

2.2.1 入渗率的动态变化 大量的研究已经表明, 土壤入渗率在入渗过程中是变化的^[1,3,23]。图 3 为 6 种雨强下入渗率在降雨过程中的动态变化, 由图中

可以看出, 坡面降雨的入渗过程可以划分为两个明显的阶段: 即入渗率恒定阶段和入渗率下降阶段, 很显然, 雨强大小 (即供水强度) 是影响初始入渗阶段降雨入渗的主导因素, 雨强越大则初始入渗率越高, 但是当坡面产流以后, 入渗率的下降也越快, 因此无论初始入渗率高低, 坡面产流以后入渗率均逐渐降低并趋向于一个稳定值。从图中还可以发现, 当雨强大于 1.2mm/min 时, 其稳定入渗率更趋于一致, 而当雨强小于该值时, 随着雨强的减小稳定入渗率有减小的趋势。其原因可能在于雨强越小则坡面径流流速越小, 因而径流侵蚀力与挟沙能力就越小, 地表也就更容易形成致密层, 从而阻碍了水分的入渗。

统计分析表明, 入渗率随降雨时间的延长呈幂函数形式降低, 表 2 列出了图 3 中 6 种雨强下入渗率与产流时间变化的回归方程, 经相关性检验均达到统计极显著水平。由表中可以看出, 方程的回归

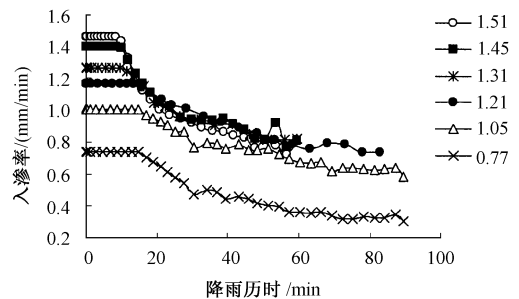


图 3 模拟降雨条件下雨强对入渗率动态变化的影响 (图例中数字为雨强, 单位: mm/min)

系数 a 随雨强的增大而增大，其数值与初始入渗率（等于降雨强度）呈线性关系，方程中指数变化的规律性不明显。

表 2 不同雨强条件下入渗率 (i) 与产流时间 (t) 的相关性分析及回归方程

降雨强度/ (mm/min)	回归方程	样本数	R^2
0.77	$i = 0.9463 t^{-0.2416}$	28	0.9127**
1.05	$i = 1.1567 t^{-0.1356}$	28	0.8887**
1.21	$i = 1.3502 t^{-0.1272}$	18	0.8663**
1.31	$i = 1.3993 t^{-0.13}$	14	0.9179**
1.45	$i = 1.4704 t^{-0.14}$	20	0.8906**
1.51	$i = 1.5025 t^{-0.1633}$	20	0.9218**

**表示相关系数达到统计极显著水平 ($\alpha = 0.01$)，下同。

2.2.2 坡面产流强度的动态变化 当降雨持续一段时间以后，地表开始出现积水，入渗率开始降低，坡面开始产流。随着降雨时间的延长和入渗率的逐渐降低，产流强度逐渐增大。统计结果表明，雨强对降雨过程中坡地产流强度有显著影响（见图 4），在雨强较小时，产流强度缓慢上升，但随着雨强的增大，产流强度的上升明显加快，这主要与雨强增大时入渗率的下降速度加快有关。由图中看出，雨强大约在 1.3 ~ 1.4mm/min 范围内有一个临界点，雨强小于该值时产流强度变化的差异相对较小，但当雨强大于该值以后，产流强度的上升急剧加快，该突变点的雨强可能就是坡面最大平均入渗率时的雨强值 1.35mm/min。经统计发现，坡面产流强度随产流时间的变化表现为极显著的对数函数关系，相应的回归方程见表 3。

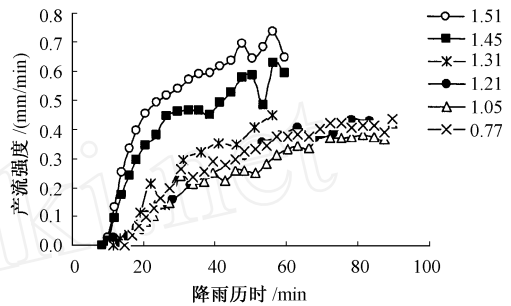


图 4 模拟降雨条件下雨强对坡面产流强度动态变化的影响 (图例中数字为雨强, 单位: mm/min)

表 3 不同雨强条件下坡面产流强度 (V_R) 与产流时间 (t) 的相关性分析及回归方程

降雨强度/ (mm/min)	回归方程	样本数	R^2
0.77	$V_R = 0.2342 \ln(t) - 0.5968$	28	0.967**
1.05	$V_R = 0.2167 \ln(t) - 0.5653$	28	0.9682**
1.21	$V_R = 0.2349 \ln(t) - 0.5994$	18	0.9805**
1.31	$V_R = 0.2916 \ln(t) - 0.7376$	14	0.9563**
1.45	$V_R = 0.3055 \ln(t) - 0.6224$	20	0.9487**
1.51	$V_R = 0.3528 \ln(t) - 0.6869$	20	0.9421**

2.3 坡地土壤水分的转化率 为了研究雨强对坡地土壤水分转化率的影响，表 4 列出了 8 次模拟降雨前后坡地 0 ~ 40cm 土层土壤的平均含水量与贮水量的变化状况。

表 4 不同雨强条件下土壤剖面 (0 ~ 40cm) 的水分变化及降雨向土壤水分的转化率

雨强/ (mm/min)	降雨历时/ min	雨量/ mm	重量含水量 (%)			贮水量/mm			转化率* (%)
			雨前	雨后	增加	雨前	雨后	增加	
0.77	89.9	69.2	6.90	16.74	9.84	35.5	86.3	50.8	73.6
1.04	60.2	62.6	5.68	15.89	10.21	29.2	83.3	53.5	85.5
1.21	85.5	103.5	8.61	22.06	13.48	44.0	112.4	68.4	66.0
1.23	58.9	72.4	6.44	18.13	11.69	32.7	93.0	60.3	83.5
1.31	60.0	78.6	6.79	16.54	9.75	35.3	85.6	50.4	64.2
1.45	59.5	86.3	6.51	17.34	10.83	32.9	88.5	55.6	63.2
1.34	60.5	81.1	8.87	16.91	8.05	45.7	87.1	41.4	51.0
1.51	60.5	91.4	7.02	17.36	10.34	35.0	87.7	52.7	57.4

* 转化率 = 贮水量增加/雨量 $\times 100\%$ 。

由表中可以看出，土壤贮水量的增加额为 40 ~ 70mm，一般在 50mm 左右，在降雨历时相对接近

时随着雨强的增大土壤贮水量略有增加, 但差异达不到统计显著水平。剖面平均含水量的增加额除个别降雨历时偏长或初始含水量较高的处理以外也一般在 10 % 左右, 相互间统计差异也不显著。这可能与试验坡长较短 (5m)、不同坡位土壤水分入渗量的差异较小有关。由表中还可以看出, 随着雨强的增大, 降雨向土壤水分的转化率呈较为明显的降低趋势, 由 85.5 % 逐渐降至 60 % 以下, 这说明因雨强的增大而增大的雨量主要是增加了径流量, 而有效入渗量的增加并不十分明显。试验表明降雨历时对土壤水分转化也有显著影响, 降雨历时较长时转化率明显降低, 雨强为 0.77mm/min 时水分转化率为 73.69 %, 显著低于 1.05mm/min 雨强的转化率 (85.5 %); 1.21mm/min 雨强水分转化率也显著低于相近的其它雨强 (1.23mm/min) 条件。1.34mm/min 雨强的水分转化率也明显偏低, 但这主要与其土壤初始含水量偏高 (8.87 %) 有关。此外, 土壤的容重或紧实度对坡地水分转化也有显著影响, 土壤翻耕会显著降低坡地水分的转化率^[15]。

3 结论

(1) 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_a 与降雨强度 i_R 具有极显著的抛物线函数关系: $i_a = -1.3302i_R^2 + 3.592i_R - 1.418$, 据此求得临界雨强 = 1.35mm/min, 最大坡面平均入渗率 = 1.01mm/min; 初始产流时间 (t_p) 随雨强的增大而减小, 二者呈幂函数关系: $t_p = 19.968i_R^{-2.1161}$; 坡面径流深与径流系数均随雨强的增大而增大, 表现为线性关系。(2) 雨强是影响坡面土壤初始入渗率的主导因素, 当坡面产流以后, 入渗率 (i) 随降雨历时 (t) 的延长呈幂函数形式降低: $i = at^b$, 式中回归系数 a 随着雨强的增大而增大, b 则没有明显的变化规律。坡面产流强度 (V_R) 随降雨历时 (t) 的延长呈对数函数形式增加: $V_R = a\ln(t) + b$ 。产流强度随雨强的增大而增大, 雨强 1.35mm/min 为产流强度变化的临界点, 雨强 > 1.35mm/min 以后, V_R 的上升速度加快。(3) 随着雨强的增大降雨的入渗量略有增加, 但降雨向土壤水分的转化率则显著降低。

参 考 文 献:

- [1] Hillel D. Soil and Water: Physical Principles and Process [M]. New York and London: Academic Press, 1971.
- [2] Philip J R. The theory of infiltration [J]. Soil Sci. 1957 - 1958, 83: 345 - 357; 435 - 448; 84: 163 - 177; 257 - 264; 329 - 339; 85: 278 - 286; 333 - 337.
- [3] Kirkby MJ. Hillslope Hydrology [M]. Chichester New York Brisbane. Toronto: John Wiley & Sons. 1979.
- [4] 沈晋, 王文焰, 沈冰, 等. 动力水文实验研究 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1991.
- [5] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述 [J]. 水科学进展, 1999, 10 (3): 311 - 318.
- [6] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响 [J]. 生态学报, 1983, 3 (2): 97 - 101.
- [7] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] 沈冰, 王文焰, 沈晋. 短历时降雨强度对黄土坡地径流形成影响的试验研究 [M]. 水利学报, 1995, (3): 21 - 27.
- [9] 沈冰, 王文焰. 降雨条件下黄土坡地表层土壤水分运动实验与数值模拟的研究 [J]. 水利学报, 1992, (6): 29 - 35.
- [10] 邵明安, 上官周平, 康绍忠, 等. 坡地水分养分动力学研究的基本思路 [A]. 邵明安主编: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业 [C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 1 - 9.
- [11] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析 [J]. 生态学报, 2000, 20 (5): 742 - 747.
- [12] 刘贤赵, 康绍忠. 黄土区考虑滞后作用的坡地水量转化模型 [J]. 土壤学报, 2000, 37 (1): 16 - 23.
- [13] 张书函, 康绍忠, 蔡焕杰, 等. 天然降雨条件下坡地水量转化的动力学模式及其应用 [J]. 水利学报, 1998, (4): 55 - 62.
- [14] 李裕元, 邵明安, 张兴昌. 模拟降雨条件下侵蚀坡地土壤水分与有效磷的空间分布特征 [J]. 水土保持

- 学报, 2001, 15 (2): 41 - 44.
- [15] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响 [J]. 农业工程学报, 2003, 19 (1): 46 - 50.
- [16] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数 [J]. 地理学报, 2000, 55 (4): 428 - 438.
- [17] 郑粉莉. 不同侵蚀条件下浅沟微地形坡面土壤水分分布研究 [A]. 邵明安主编: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业 [C]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999. 51 - 56.
- [18] 黄明斌, 李玉山, 康绍忠. 坡地单元降雨产流分析及平均入渗率计算 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5 (1): 64 - 68.
- [19] 徐锐. 关于天然降雨和人工降雨的动能计算方法 [J]. 水土保持通报, 1981, (1): 37 - 39.
- [20] 周佩华, 张学栋, 唐克丽. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟试验大厅降雨装置 [J]. 水土保持通报, 2000, 20 (4): 28 - 30.
- [21] 张光辉, 梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究 [J]. 水土保持学报, 1995, 9 (3): 78 - 83.
- [22] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原暴雨空间分布的不均匀性及点面关系 [J]. 水科学进展, 1999, 10 (2): 165 - 169.
- [23] 朱祖祥. 土壤学 [M]. 北京: 农业出版社, 1983.

Experimental study on characteristics of water transformation on slope land

LI Yu-yuan^{1,2}, SHAO Ming-an^{1,2}

(1. Institute of Geographic Science and Nature Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling 712100, China)

Abstract: The infiltration process and characteristics of runoff yielding on slope land under the condition of raining with different intensities are studied experimentally in laboratory for rainfall simulation. It is found that: 1. the average infiltration rate varies with rainfall intensity following a parabolic function law; 2. after the incipient of runoff, the infiltration rate decreases exponentially with the duration of raining but the runoff yielding intensity is logarithmically related to the raining duration; 3. the infiltration rate increases if the rainfall intensity increases, but the ratio of rainfall transformed into soil will significantly decrease.

Key words: rainfall simulation experiment; infiltration rate; rainfall intensity; slope; water transformed into soil