

# 塬土坡面降雨水沙运移实验研究<sup>x</sup>

李毅<sup>1,2</sup>, 邵明安<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国科学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: 黄土高原是我国植被破坏与水土流失最为严重的地区。本文基于室内坡地降雨实验, 分析了塬土坡面降雨入渗补给系数的变化, 对比了不同雨强影响下径流泥沙含量和累积泥沙含量的时间变化趋势, 并将侵蚀与入渗结合, 分析了同时段产沙量和入渗率的变化关系, 研究表明: 入渗补给系数随雨强增大而逐渐减小, 两者可描述为线性关系, 雨强越小, 入渗补给系数越高; 降雨初始产沙值最大, 在产沙 10 min 内变缓。雨强大的, 初始产沙量和稳定产沙量都稍大, 但总体差异不大, 产沙量分布曲线形状与入渗率曲线极为相似; 不同雨强下累积泥沙量与降雨历时之间存在明显的幂函数关系, 且幂函数的指数部分基本随降雨雨强增加而逐渐增加; 不同雨强下入渗率和累积泥沙量的变化趋势相反, 当累积泥沙量增加, 相应的土壤入渗率减小, 两者变化趋势随雨强增大而趋于明显。

关键词: 雨强; 产沙; 入渗; 人工降雨; 塬土

中图分类号: S157.1; S151.92

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2007)04-0029-05

## Experiment Studies on Water and Sediment Movement for Lou Soil During Rainfall on Loess Slope Land

LI Yi<sup>1,2</sup>, SHAO Ming-an<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest Sci-Tech University for Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: There are close relations between the development of Loess Plateau and breaking-off of Yellow River. In this paper, based on rainfall experiments of Lou soil, the variation trends of infiltration supplement coefficient to rainfall were analyzed, the time variation trends of sediment content in runoff and the cumulative sediment content were compared at different rainfall intensities, furthermore, the erosion data was connected with infiltration characteristics to discuss their relations observed at the same time. The results showed: the infiltration supplement coefficient of rainfall decreased when the rainfall intensity increased, the smaller the rainfall intensity, the larger the rainfall infiltration supplement coefficients, and the linear functions were fitted well to them; at the beginning of rainfall, the biggest value of sediment content existed, but its variation trends became flat within 10 minutes of sediment producing. The larger the rainfall intensities, the larger the initial and steady sediment contents, but their total variation trends differs little. Moreover, there are similar trends of sediment distribution curve and infiltration ratio curve; good power functions was fitted for cumulative sediment content and rainfall time at different rainfall intensities, and the exponential part increased when the rainfall intensities increased. The variation trends of infiltration ratios differed with that of cumulative sediment content, when the cumulative sediment content increased, the corresponding infiltration rate decreased, their variation trends was obvious when the rainfall intensities increased.

Key words: rainfall intensity; sediment production; infiltration rate; artificial rainfall; Lou soil

黄土高原位于我国内陆腹地, 是我国植被破坏与水土流失最为严重的地区, 该地区土层深厚, 地下水位深, 降水几乎成为土壤水的唯一补给源, 且暴雨多、雨强大, 生态环境十分脆弱。长期从事黄土高原区自然地理和水分状况的研究者指出, 黄土高原坡地尤其是陡坡的存在, 是造成严重水土流失的主要地貌因素<sup>[1]</sup>。黄土高原的治理开发与黄河断流关系密切<sup>[2]</sup>。

<sup>x</sup> 收稿日期: 2007-03-19

基金项目: 西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-131)

作者简介: 李毅, 女, 生于 1974 年, 博士(后), 副教授。主要从事农业水资源和土壤物理研究。E-mail: liyikitty@126.com

对于黄土类土壤的降雨侵蚀特征,国内外学者已做了大量研究<sup>[3-14]</sup>。如蔡进军等研究表明:雨强较大时,随时间推移,单位体积泥沙含量递减;在较小雨强下,随时间推移,单位体积泥沙含量呈递增趋势;雨强和土壤侵蚀模数的关系符合幂函数方程:  $Q = 0.017I^{2.5442}$ 。但国外的研究中,坡度一般很小,国内的研究则针对不同地区按特定土壤进行。本文基于室内坡地人工降雨实验,分析了降雨入渗补给系数的变化,对比了不同雨强影响下径流泥沙含量和累积泥沙含量的时间变化趋势,并将侵蚀与入渗结合,分析了同时段产沙量和入渗率的变化关系,研究结果对于黄土水土保持有一定参考意义。

## 1 材料与方 法

在中国科学院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人工降雨大厅,完成不同坡度及不同容重影响下黄土人工模拟降雨入渗及产流产沙实验。以容重  $1.22, 1.3 \text{ g/cm}^3$ , 将土样分层均匀装至土槽,其容积为长  $\times$  宽  $\times$  高 =  $100 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}$ 。土槽设有可调节坡度装置,坡度可在  $0 \sim 25^\circ$  之间变化。土槽底部有直径为  $0.5 \text{ cm}$  的梅花状排气孔,装土高度为  $110 \text{ cm}$ ,槽出口设有  $7 \text{ cm}$  高的多排孔,以便将径流和泥沙引出槽口。参照黄土区典型降雨特征,选定  $0.5 \sim 2.0 \text{ mm/min}$  范围内的不同平均雨强进行降雨实验。预先进行  $5 \text{ min}$  雨强初步率定后,正式降雨。不同条件下的降雨历时依观测目的持续  $60 \text{ min}$  或  $90 \text{ min}$  不等。为保证相同处理下雨强的均匀性,每场降雨中同时对  $3 \sim 5$  个土槽降雨<sup>[6,7]</sup>。

降雨开始后,根据秒表计时,记录径流产生时间,并以产流开始时  $1 \text{ min}$ 、产流  $5 \text{ min}$  后  $3 \text{ min}$  的时间间隔采径流样品;同时,用染色法分别记录不同土槽上预先标记的  $60 \text{ cm}$  直线段径流历时,用于计算流速。实验结束后用  $1000 \text{ ml}$  量筒测定水样体积,并将水样沉淀后烘干泥沙样品称其质量。

## 2 基本原理

### 2.1 入渗补给系数

对于平地,入渗补给系数是总入渗量占总降雨量的百分比;在坡面降雨过程中,入渗补给系数是累积入渗量与坡面总承雨量的比值,它表征降水向土壤水转化的比例关系,也说明降雨水入渗的效率,同时间接反映出径流损失的相对值,该指标是反映降雨、入渗和水土保持的重要特征参数。

假定降雨过程中雨强变化不大,若以  $R$  表示降雨雨强,  $f$  表示入渗率,  $A$  表示坡度,  $t$  表示降雨历时,忽略风的影响及地表蒸发,则入渗补给系数  $i$  可根据下式计算:

$$i = \int_0^t f t dt / R t \cos A = (R t \cos A - q) / R t \cos A = 1 - q / R t \cos A \quad (1)$$

对于可人为控制的模拟降雨,  $R$  在降雨历时内基本浮动不大,取时段内降雨量的平均值即可;对特定场次降雨  $t$  为定值,因此上式中的入渗系数主要取决于入渗率或累积入渗量,而土壤累积入渗量除直接与坡面产流特性有关外,外部条件如雨强、坡度、降雨场次,加上更多的内部条件包括容重、土壤初始含水量、质地等也影响入渗特性,因此入渗补给系数虽然计算简单,但波动很大。

### 2.2 坡面产流公式

坡面产流强度是单位时间内的坡面径流深,若以  $W$  表示产流强度,  $F$  表示累积入渗量,则由于坡面净雨深  $R_{\text{net}}$  为坡面径流深  $q$  与坡面入渗量  $F$  的和,因此上述各项对时间的导数也同样存在定量关系:

$$R_{\text{net}} = F + q \quad (2)$$

$$R_{\text{net}} / dt = F / dt + q / dt \quad (3)$$

式中:  $q / dt$  即为坡面产流强度  $W$ ,  $F / dt$  为入渗率  $f$ 。因人工模拟降雨的雨强较稳定,因此对于坡度一定的土壤,  $R_{\text{net}} / dt$  为常数,得出如下关系:

$$f + W = \text{const} \quad (4)$$

当雨强、容重、坡度等因素不同时,  $\text{const}$  的值也有所不同,该值应等于单位时间的坡面净雨。

## 3 结果分析

### 3.1 入渗补给系数的变化

根据多场降雨实验资料,可对不同容重、不同坡度、不同初始表层湿度和不同雨强条件下入渗补给系数进行对比计算。根据对不同容重和不同坡度条件下的计算结果,将入渗补给系数随雨强的变化关系做图,详见图 1 及图 2。

根据以上两图及相应的实测资料计算结果,可得出如下结论: (1) 容重和坡度一定条件下,入渗补给系数随

雨强增大而逐渐减小。雨强越小,入渗补给系数越高,相应地,其径流系数也即径流量占坡面净雨量的比例越小。实测资料表明,雨强为 $0.54\text{ mm/min}$ 时,容重为 $1.22\text{ g/cm}^3$ 的5°坡面入渗补给系数为 $0.9406$ ,入渗比例相当大,而雨强为 $1.86\text{ mm/min}$ 时,容重为 $1.3\text{ g/cm}^3$ 的25°坡面入渗补给系数仅为 $0.2483$ ,差异非常明显。(2)相同容重下,坡度越小,入渗补给系数曲线整体越大。容重越大、坡度越陡,入渗补给系数随雨强降低的趋势线越陡。(3)入渗补给系数随雨强增加而减少的关系在不同坡度和容重下均可用线性关系描述。根据图中的线性关系可知,不同容重和坡度条件下线性关系的斜率均为负值,而截距均为正数,且小于 $1.25$ 。对上述线性关系的截距和斜率的比值进行分析,发现坡度较大时截距与斜率比的绝对值更大,且在相同容重下( $1.22\text{ g/cm}^3$ ),坡度增加则入渗补给系数随雨强变化线性关系的截距降低,而其斜率则增加。(4)总体上,入渗补给系数受雨强影响最明显,坡度、初始含水量和容重次之。

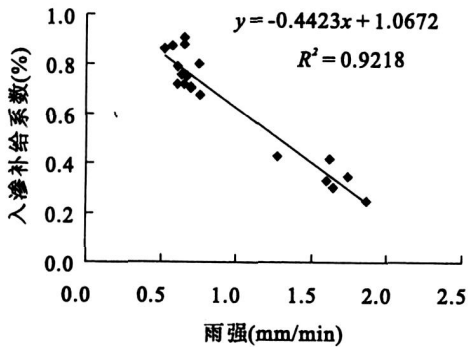


图1 入渗补给系数的变化(容重 $1.3\text{ g/cm}^3$ , $25^\circ$ )

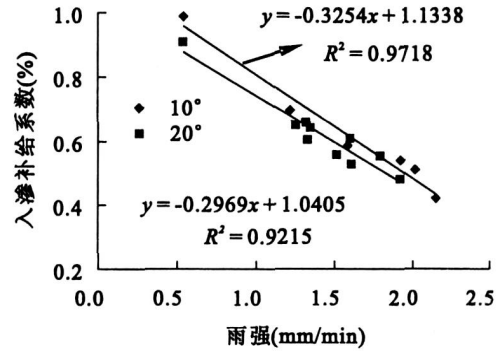


图2 入渗补给系数的变化(容重 $1.22\text{ g/cm}^3$ , $5^\circ$ )

### 3.2 坡土坡面降雨的产沙特征

降水在坡面的水量转化有两个方面,即入渗和径流。坡地表土和径流的相互作用,导致径流中携带的泥沙随径流向流域外迁移而造成侵蚀。因此降雨动能是导致侵蚀的直接原因。坡土坡面人工降雨模拟实验表明,单就泥沙量而言,在较大雨强条件下,坡土坡地径流的泥沙损失量基本呈稳定变化趋势,降雨期内没有泥沙量的突变,实验过程中也未观察到细沟出现,因此其侵蚀仅为量变过程。

侵蚀不严重前提下,泥沙量的时间分布相当有规律,雨强差异不大的泥沙量随降雨时间的延长基本具有类似特点。为便于更详细地说明产沙量的时间分布特征,将容重为 $1.22\text{ g/cm}^3$ 、雨强变化范围为 $1.42\sim 1.51\text{ mm/min}$ 、坡度均为 $25^\circ$ 的坡土坡面侵蚀泥沙量随时间变化作图,见图3。同时,为获得雨强影响土壤侵蚀的定量关系,将容重为 $1.22\text{ g/cm}^3$ 、雨强为 $1.21\sim 1.51\text{ mm/min}$ 、坡度为 $25^\circ$ 的泥沙累积过程进行分析对比,并进行最小二乘法适线拟合,见图4。

由图3可知:(1)在 $1.42\sim 1.51\text{ mm/min}$ 雨强范围内,坡面某时段侵蚀产沙量均对降雨时间具有相似趋势的响应。坡面产沙的最初产沙值在整个降雨时段内为最大值,随时间延长泥沙量逐渐降低,且其降低趋势在产沙初期更明显,在产沙 $10\text{ min}$ 内该趋势变缓。

(2)在整个降雨期,雨强大的,初始和稳定泥沙量都稍大,在降雨初期侵蚀量随时间延长很快降低,降雨 $30\text{ min}$ 后基本稳定。

(3)实测降雨资料表明, $1.42, 1.46, 1.51\text{ mm/min}$ 的雨强下初始泥沙量分别为 $27.5, 37.6, 45.4\text{ g}$ ,稳定泥沙量分别为 $5.0, 7.3, 10.5\text{ g}$ 。此外,泥沙量分布曲线形状与入渗率曲线极为相似,这也为我们分析降雨入渗、径流与泥沙侵蚀关系提供了可能。

由图4可见:(1)不同雨强条件下,累积泥沙量均随降雨历时增加而逐渐增加,且其趋势随雨强增大而增大,不同雨强之间累积泥沙量差异较明显。降雨 $60\text{ min}$ 、雨强为 $1.21, 1.31, 1.42, 1.51\text{ mm/min}$ 的总泥沙量分别为 $169.0, 223.2, 256.7, 375.8\text{ g}$ ,可见雨强不同对侵蚀量有重要影响,同时降雨时间也决定侵蚀量大小。

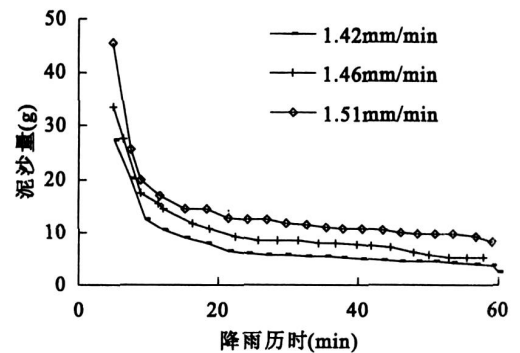


图3 坡土泥沙量随降雨时间的变化趋势

(2) 不同雨强下累积泥沙量与降雨历时之间存在明显的幂函数关系, 由图中回归关系式可知, 幂函数的指数部分基本随降雨雨强增加而逐渐增加, 且回归系数较高。

(3) 根据实测资料, 坡面降雨的雨强越大, 其径流量越大, 因此能携带更多的泥沙量, 从而造成更大的土壤侵蚀。雨强变化时, 土坡面累积泥沙量在 60 min 内呈稳定的缓慢增加趋势, 但侵蚀量在降雨期内没有突变。因此可以推测雨强小于 1.21 mm/min 条件下 60 min 内、25°土坡面降雨侵蚀泥沙量只会减少, 而不会突增。

(4) 不同雨强对应的累积泥沙量  $W$  随降雨历时  $t$  的变化可用指数关系表达, 依次为: 雨强 1.21 mm/min:  $W = 12.918t^{0.6362}$ ,  $R^2 = 0.9703$ ; 雨强 1.31 mm/min:  $W = 13.863t^{0.6991}$ ,  $R^2 = 0.9603$ ; 雨强 1.42 mm/min:  $W = 15.249t^{0.7070}$ ,  $R^2 = 0.9659$ ; 雨强 1.51 mm/min:  $W = 10.899t^{0.8775}$ ,  $R^2 = 0.9641$ 。

因降雨次数所限, 我们没有更多地探索土坡降雨侵蚀泥沙量趋于零的雨强范围, 即土坡侵蚀的雨强临界值, 该部分研究可在今后的工作中继续完成。

产沙强度是在降雨历时内, 侵蚀泥沙量与观测时段的比值, 它表明单位时间内泥沙量随降雨历时的变化趋势。图 5 显示了容重为 1.22 g/cm<sup>3</sup>、雨强范围 1.21 ~ 1.51 mm/min、坡度为 25°的土坡降雨产沙强度的时间分布趋势。

由图 5 可见, 在整个降雨历时内初始产沙强度最大, 随时间增加产沙强度快速减少, 降雨 20 min 后产沙强度均达到稳定值。产沙强度随时间变化趋势和雨强有关, 雨强越大, 同时刻产沙强度在降雨历时内的值越大。根据实测资料, 雨强分别为 1.21, 1.31, 1.42, 1.46, 1.51 mm/min 的初始产沙强度相应为 20.0, 21.2, 25.0, 33.6, 45.4 g/min, 稳定产沙强度分别为 2.6, 2.8, 3.0, 3.8, 5.5 g/min, 差异不大。

### 3.3 土坡面产沙与入渗的关系

在降雨过程中, 土壤表层颗粒随坡面径流流动而流失, 径流流速和流量大小决定着携沙能力大小, 因此坡面产沙量和产沙能力与坡面径流特性的关系很密切。根据降雨实测资料, 将降雨同时段内坡面产沙量与径流体积相比可得径流含沙浓度。将计算的不同雨强下径流含沙浓度随降雨历时变化曲线绘于图 6。同时, 由于坡面净雨量为坡面径流量与累积入渗量的和, 降雨水量在降雨历时内是守恒的, 基于径流量和累积入渗量之间的关系, 产沙强度与入渗存在某种联系也成为可能, 为比较两者变化趋势, 将时段入渗率与累积泥沙量同绘于直角坐标系, 见图 7。

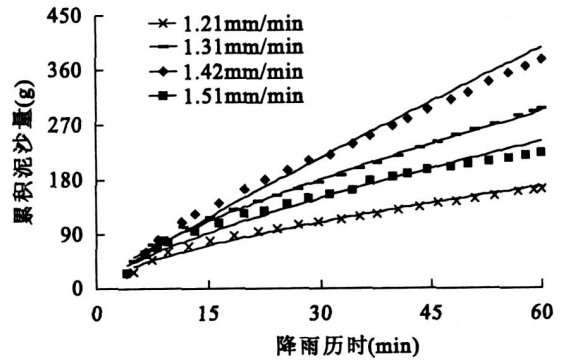


图 4 不同雨强下累积泥沙量时间分布

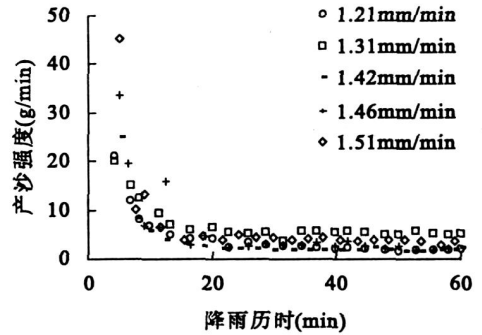


图 5 产沙强度的时间变化趋势

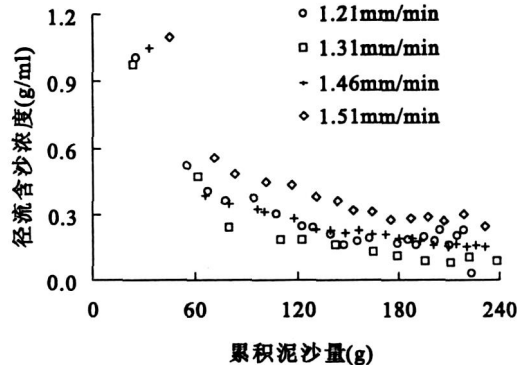
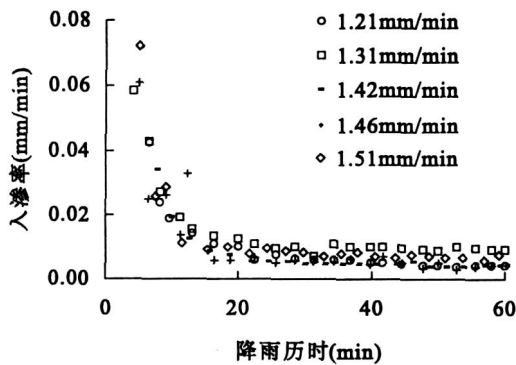


图 6 径流含沙浓度的时间变化趋势

图 7 累积泥沙量与入渗率的关系

由图6可见:(1)类似于产沙强度的时间变化趋势,在整个降雨期,径流含沙浓度在产流初期随时间增加而快速减少,降雨20 min后基本稳定。(2)雨强较大情况下径流含沙浓度曲线整体上稍高,其中雨强最大者1.51 mm/min时的初始径流含沙浓度为0.072 g/ml,其稳定径流含沙浓度为0.009 g/ml;而1.21 mm/min的小雨强下,初始和稳定径流含沙浓度分别为0.023, 0.006 5 g/ml,差异不大。

由图7可见:(1)不同雨强下入渗率和累积泥沙量的变化趋势相反。当累积泥沙量增加,相应的土壤入渗率减小,两者变化趋势随雨强增大而趋于明显,大雨强下相同的累积泥沙量对应的入渗率也相应大些。(2)累积泥沙量和入渗率之间的变化趋势符合质量守恒原理,在定雨量条件下,径流量越大,径流含沙量也越多,而入渗量则减少,因此单位时间渗入土壤的水量也越少,所以总体上泥沙量与入渗率是此消彼长的关系。同时,雨强越大,在不超过土壤实际入渗能力前提下,能供土壤入渗的水量也相应多些,因此在相同的泥沙量下雨强大的入渗率也稍大。

## 4 结 论

(1)入渗补给系数随雨强增大而逐渐减小,两者可描述为线性关系,容重越大、坡度越陡,入渗补给系数随雨强降低的趋势越缓。雨强越小,入渗补给系数越高。

(2)降雨初始产沙值最大,在产沙10 min内变缓。雨强大的,初始产沙量和稳定沙量都稍大,但总体差异不大,产沙量分布曲线形状与入渗率曲线极为相似,为分析降雨入渗、径流与泥沙侵蚀关系提供了可能。

(3)累积泥沙量均随降雨历时增加而逐渐增加,且其趋势随雨强增大而增大,不同雨强之间降雨侵蚀的泥沙量差异较明显。不同雨强下累积泥沙量与降雨历时之间存在明显的幂函数关系,且幂函数的指数部分基本随降雨雨强增加而逐渐增加,且回归系数较高。降雨期径流含沙浓度在降雨产流初期随时间增加而快速减少,在降雨20 min后基本稳定。

(4)不同雨强下入渗率和累积泥沙量的变化趋势相反,当累积泥沙量增加,相应的土壤入渗率减小,两者变化趋势随雨强增大而趋于明显,大雨强下相同的累积泥沙量对应的入渗率也相应大些。

### 参考文献:

- [1] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分的研究[M]. 北京:科学出版社,2000.173-196.
- [2] 李玉山. 黄土高原治理开发与黄河断流的关系[J]. 水土保持通报,1997,17(6):41-45.
- [3] Sean K C, Ming-ko W. Slope runoff processes and flow generation in a sub arctic, sub alpine catchments[J]. J. Hydro., 2001, 253: 110-129.
- [4] Islam M N, Sivakumar B. Characterization and prediction of runoff dynamics: a nonlinear dynamical view[J]. Advances in Water Resources, 2002, 25: 179-190.
- [5] 余新晓,陈丽华. 人工降雨条件下的入渗实验研究[J]. 水土保持学报,1989,3(4):15-21.
- [6] 沈冰,王文焰,沈晋. 短历时降雨对黄土坡地径流形成影响的实验研究[J]. 水利学报,1995,17(3):21-27.
- [7] 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.
- [8] Hignett C T, Gusli S, Cass A, et al. An automated laboratory rainfall simulation system with controlled rainfall intensity, raindrop energy and soil drainage[J]. Soil Technology, 1995, 8: 31-42.
- [9] Nicola F, Jorg B, et al. Changing soil and surface conditions during rainfall single rainstorm/subsequent rainstorm[J]. Cate-na, 1999, 37: 355-375.
- [10] Gaze S R, Simmonds L P, Brouwer J, et al. Measurement of surface redistribution of rainfall and modeling its effect on water balance calculations for a millet field on sandy soil in Niger[J]. J. Hydro., 1997, 188-189: 267-284.
- [11] Morgan R P C, McIntyre K, Vickers A W, et al. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland[J]. Soil Technology, 1997, 11: 291-299.
- [12] Fentie B, Yu B, Silburn M D, et al. Evaluation of eight different methods to predict hillslope runoff rates for a grazing catchment in Australia[J]. J. Hydro., 2002, 261: 102-114.
- [13] 杨弘,裴铁王. 森林流域非饱和土壤水与饱和土壤水转化研究进展[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1773-1779.
- [14] 蔡进军,张源润,王月玲,等. 坡地雨水资源潜力分析及径流侵蚀的动态变化[J]. 水土保持学报,2005,19(4):44-47.