

# 陡坡林地加速侵蚀的水动力学及能耗机制研究

陈磊<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 徐国策<sup>2</sup>, 宋炜<sup>3</sup>

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中科院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 山东省 水利勘测设计院, 山东 济南 250013)

**摘要:** 利用野外原位模拟降雨试验, 对陡坡林地加速侵蚀下的薄层水流水力学参数和能耗特征进行了研究。结果表明, 林地原状延缓径流作用显著, 流速维持在 0.05~0.09 m/s, 加速侵蚀后流速均增加, 且自上坡面至下坡面有增大的趋势。原状林地处理的雷诺数( $R_e$ )为 160.8, 属于层流; 加速侵蚀后坡面  $R_e$  显著增加, 处于层流与紊流之间的过渡流状态。与原状相比, 去除枯枝落叶层和除地上部分处理的  $R_e$  分别增加了 114.9%~245.1% 和 322.2%~1 012.9%, 阻力系数( $f$ )分别减少了 5.2%~90.6% 和 42.6%~270.3%; 除枯枝落叶层处理的中下段和下段弗汝德数( $F_r$ )均大于 1, 为急流, 坡上和中上段  $F_r$  均小于 1, 为缓流。翻耕处理的径流流速减缓,  $R_e$  减小;  $F_r$  在坡中上、中下段、下段增加了 181.6%~72.3%,  $f$  减少了 41.3%~66.8%, 坡上  $F_r$  减少了 67.3%, 但  $f$  表现为增加。在降雨初期动能较低, 随降雨历时增加呈缓慢上升, 最后趋于稳定, 且径流势能远大于径流动能。坡面除枯枝落叶层、除地上部分和翻耕加速侵蚀后, 坡面能耗增大, 侵蚀量与能耗相关性较好。

**关键词:** 林地; 加速侵蚀; 流速; 能耗

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)04-0005-05

中图分类号: S157.1

## Hydraulic Characteristics and Flow Energy Consumption of Accelerated Erosion on Steep Slope Woodland

CHEN Lei<sup>1,2</sup>, LI Zhan-bin<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, XU Guo-ce<sup>2</sup>, SONG Wei<sup>3</sup>

(1. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048,

China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Xi'an Research Academic of Environmental Sciences, Xi'an, Shaanxi 710002, China)

**Abstract:** The hydraulic characteristics and flow energy consumption of runoff on steep slope woodland were studied under accelerated erosion condition with simulated rainfalls. The results show that the natural soil surface had a significantly effect on reducing flow velocity, which remained very slow as 0.05 to 0.09 m/s. The flow velocity increased under manmade accelerated erosion. Furthermore, the increasing amplitude was greater on the lower slope position than the upper one. The Reynolds number  $R_e$  of the runoff on natural soil surface of the woodland was 160.8, which can be recognized as laminar flow. Under manmade accelerated erosion, the flow shifted to a transition state between laminar and turbulent flow condition. Compared with natural soil surface, the Froude number  $F_r$  of the middle and lower slope position with litter removal increased by 114.9%~245.1% and 322.2%~1 012.9%, and the friction coefficient  $f$  increased by 5.2%~90.6% and 42.6%~270.3%, respectively. The flow velocity on the bottom and mid-lower slope sections were rapid with  $F_r > 1$ , and slow on the upper and mid-upper slope sections with  $F_r < 1$ . The treatment of tillage increased  $F_r$  and  $f$  by 181.6%~72.3% and 41.3%~66.8% on the bottom, mid-lower and mid-upper slope sections. In the upper section,  $F_r$  decreased by 67.3% while  $f$  increased by 8 times. The potential energy of the surface flow was greater than kinetic energy, the kinetic energy level of the flow was low in early stage of simulation rainfall and then increased and finally stabilized over the experiment time. Compared with

收稿日期: 2011-05-22

修回日期: 2011-07-21

资助项目: 国家重点基础科学(973)研究发展计划“粗沙风—洪产输物理过程及模拟”(2011CB403302), “黄土坡面土壤养分流失特征与控制机理”(2011CB411903); 国家科技支撑计划课题“农田水土保持工程与耕作关键技术研究”(2011BAD31B01)

作者简介: 陈磊(1982—), 男(汉族), 陕西省三原县人, 博士, 主要从事水土生态环境演变研究。E-mail: chenlei061@163.com。

通信作者: 李占斌(1962—), 男(汉族), 河南省镇平县人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zbli@mail.xaut.edu.cn。

the natural soil surface, the energy consumption of the slope surface increased in all the treatments of forest litter removal, cutting above ground parts and tillage. The intensity of soil erosion was closely related to energy consumption of the slope surface.

**Keywords:** woodland; accelerated erosion; flow velocity; energy consume

坡面是侵蚀发生的基本单元<sup>[1-2]</sup>。目前对于坡面侵蚀产沙的定性和经验研究较多,但关于其水力学特性研究较少<sup>[3]</sup>。坡面径流流速和流态(雷诺系数、弗劳德数、阻力系数)是表征水力学特性的重要参数,在坡面流运动的物理过程研究中一直是国内外研究热点<sup>[4-7]</sup>,研究主要集中在缓坡模拟冲刷和土槽的试验中,关于人工模拟暴雨在陡坡原位小区上的水力学特征和能耗研究较少<sup>[8-9]</sup>。且对于水力学指标研究多利用平均流速、径流宽等研究坡度和放水量对整个坡面平均侵蚀状况影响进行研究,关于其时空变化过程的研究较少<sup>[10-13]</sup>。坡面侵蚀实际上径流克服阻力,消耗能量作功过程<sup>[14]</sup>,根据能量守恒定律结合坡面水流动力参数,从侵蚀发生的初始状态和终结状态能量变化研究,为描述坡面径流动力过程提出了新的思路<sup>[15-16]</sup>。通过野外原位模拟降雨对陡坡林地人为加速侵蚀过程中径流水动力学特性和能耗时空变化过程进行研究,以期黄土高原人为加速侵蚀机理和侵蚀预报模型研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

试验于 2008 年 7 月在黄河水利委员会天水水土保持科学试验站的桥子沟流域(34°34'N,105°43'E)进行,该区属黄土丘陵沟壑区第Ⅲ副区,干燥少雨,大陆性气候,多年平均降水量 526.1 mm,降水年际变幅大,年内分配不均,5—10 月份降水量占全年降水量的 83.5%,汛期多以暴雨形式出现,汛期的输沙量相当与年输沙总量的 98%。土壤类型主要以黄土质黑褐土为主,年侵蚀模数为 2 310.4~4 270.6 t/km<sup>2</sup>。

在陡坡林地选择原状、除枯枝落叶层(保留草被)、除地上部分(贴地剪草地上部分)和翻耕这 4 种典型的加速侵蚀方式,建立原位模拟降雨小区,小区面积为 2 m×10 m,两侧用薄钢板隔离,进行人工模拟降雨。模拟降雨装置采用西安理工大学自行设计研发的侧喷式降雨器,有效雨滴降落高度为 6 m,雨滴雾化效果良好。为了保证试验准确性,降雨在无风条件下进行,每次试验前对降雨强度进行率定,并对降雨均匀性进行检验。雨强 90 mm/h,降雨历时为产流后 30 min,每 1 min 接取 1 次样品(置换法测其泥沙含量),其余径流全收集在径流桶中,测定径流量。同时将坡面均分为 4 段,自上而下依次是坡上段,中上段,中下段及下段,坡面在降雨的同时每段测

定流速(高锰酸钾示踪法)、径流宽、径流深和水温等水力学参数。

雷诺系数计算公式为:

$$R_e = \frac{VR}{\nu} \quad (1)$$

式中: $R_e$ ——雷诺数; $V$ ——断面平均流速; $R$ ——过水断面水力半径,近似与水深  $h$ ;  $\nu$ ——水流运动黏滞系数与温度有关,因本研究降雨在水温 23~25 °C,为方便计算,黏滞系数近似取  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

弗汝德数计算公式为:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

式中: $F_r$ ——弗汝德数; $h$ ——过水断面水力半径; $g$ ——重力加速度。

阻力系数计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (3)$$

式中: $f$ ——Darcy—Weisbach 阻力系数; $J$ ——水流能坡。在实际应用中,常用地表实际坡度代替水力能坡,可采用坡面比降直接计算。

在理想情况下,单宽水流到达坡面任意断面时的总能量应为:

$$E_{\text{总}} = E_{\text{坡势能}} + E_{\text{动}} = \rho QgL \sin\theta + \frac{1}{2} \rho QV_1^2 \quad (4)$$

坡面上径流从坡顶到坡面上任意断面处的能量耗损为:

$$E_{\text{耗}} = E_{\text{总}} - E_{x\text{总}} = \rho Q'g(L-X) \sin\theta - \frac{1}{2} \rho Q'V_x^2 \quad (5)$$

式中: $L$ ——试验小区长度(m); $V_x$ ——到坡顶的距离为  $X$  的坡面任意一点的含沙水流平均流速(m/s); $Q$ ——坡面  $X$  断面处的径流流量; $\rho$ ——水的密度(kg/L); $m$ ——降水质量(kg); $T$ ——试验所持续的时间(min); $E_{\text{总}}$ ——降雨过程中总能量; $E_{\text{耗}}$ ——坡面径流出口处在整个试验过程中消耗的总能量(J/min); $Q'$ ——由坡顶到坡面任意断面处的径流量。

## 2 结果分析

### 2.1 林地开垦后侵蚀坡面流速的时空的变化

坡面流速是表征坡面径流侵蚀动力学的重要参数。图 1 为林地原状、除枯枝落叶层、除地上部分和翻耕后 4 种典型加速侵蚀过程的坡面流速的时空变化情况。在试验雨强下,因坡面径流的重力作用,受

到草的阻力减少,坡面自上至下流速有增加趋势。林地自然状态下草被茂盛,无法进行分段观测,故只测定总流速;林地原状下延缓径流的作用显著,流速维持在  $0.09 \sim 0.05 \text{ m/s}$ 。与原状相比,除去枯枝落叶层后径流流速显著增加,维持在  $0.07 \sim 0.22 \text{ m/s}$ ,其中坡中下段和下段面流速显著大于坡上段和中上段;除去草地地上部分后,流速也显著增加,且略大于除枯枝落叶层;在坡下和中下段流速维持在  $0.13 \sim$

$0.25 \text{ m/s}$ ,坡上和中上段维持在  $0.06 \sim 0.11 \text{ m/s}$ 。毁林翻耕后,土壤微地形发生改变,孔隙度增加,入渗量增加,在降雨  $15 \text{ min}$  内以入渗为主,径流流速有所减缓,在降雨  $15 \text{ min}$  后,土壤入渗率下降,径流流速显著增加;坡下、中上和中下段流速在前  $15 \text{ min}$  显著增加,后  $15 \text{ min}$  趋于稳定,维持在  $0.15 \text{ m/s}$ ;在整个降雨过程中,以坡上段流速最小且稳定,维持在  $0.04 \sim 0.05 \text{ m/s}$ 。

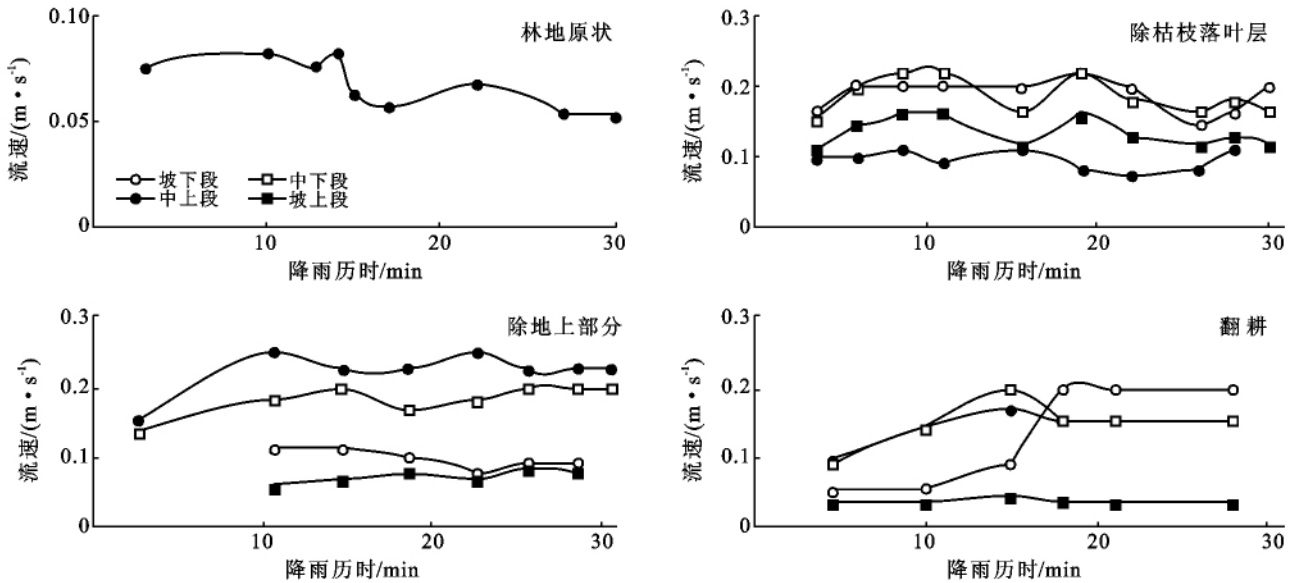


图 1 林地加速侵蚀后坡面各断面流速随时间的变化

## 2.2 坡面径流流态空间变化

通过对径流流速、水深和温度等指标的测定,计算坡面径流的雷诺系数,分析坡面径流雷诺系数判断其流态属于层流还是紊流,层流中黏性力对径流的影响作用大于惯性力,径流可保持稳定规则运动,紊流则相反。由表 1 可以看出,林地除地上部分的  $R_e$  大于明渠水流临界值 1 000,为紊流。其它各种方式下  $R_e$  均小于临界值,均为层流。原状坡面植被减缓径流,径流宽增加,水深和水力学半径降低,雷诺系数为 160.8;加速侵蚀后坡面  $R_e$  显著增加,处于层流与紊流之间的过渡流状态。林地去除枯枝落叶层后  $R_e$  比原状下增加了  $114.9\% \sim 245.1\%$ ;且坡面下断面大于坡上下断面。林地去除地上部分后  $R_e$  高于原状和除枯枝落叶层,比原状增加了  $322.2\% \sim 1 012.9\%$ ,其中坡中上段为紊流。毁林翻耕后坡面来水受到入渗和土壤糙度的影响,  $R_e$  变化差异显著,试验中在坡中上和中下段产沙侵蚀沟,单宽流量变大,水力学半径减少,所以  $R_e$  也呈减小趋势。

弗洛德数反映了坡面水流的惯性力与重力之比。由表 1 可以看出,林地加速侵蚀后  $F_r$  变化范围在

$0.14 \sim 1.42$  之间,其不同坡位差异显著。林地原状下  $F_r$  为 0.44,除枯枝落叶层后  $F_r$  增加,其中坡面中下和下段增加了  $223.4\%$  和  $163.3\%$ ,且均大于 1,径流的惯性作用力大于径流,为急流,表明径流从坡面上往运动过程中,惯性力增大,扰动土壤能力增大,侵蚀产沙量也相应的变大;坡上和中上段比原状下增加了  $2.0\%$  和  $61.4\%$ ,但  $F_r$  均小于 1,径流流态为缓流。除去地上部分后,坡下段  $F_r$  大于 1 为急流,其它断面均为缓流。与原状下相比,翻耕后  $F_r$  变化也不同,坡下、中上和中下段分别增加了  $29.7\% \sim 181.6\%$ ,上段减少了  $67.3\%$ ,这与坡上主要受雨滴溅蚀为主,从上坡面到下坡面出现细沟和跌坎,侵蚀量增加有关。

坡面径流在向下流动的过程中受到的来自水土界面的阻滞水流的摩擦力,土壤侵蚀水动力学常用 Darcy—Weisbach 阻力系数  $f$  表示,它是径流流态、下垫面粗糙程度、断面特征等的综合表现。由表 1 可以看出,本研究中坡面水流阻力系数在  $1.84 \sim 180.41$  之间。原状下草被茂盛,对径流的减缓作用强,  $f$  高达 19.56;与原状相比,除枯枝落叶层后  $f$  减少  $5.2\% \sim$

90.6%，且坡上的阻力系数大于坡下部；除地上部分后，坡中下和下段  $f$  减少 86.4% 和 42.6%，坡上和坡中上段增加了 81.4% 和 270.3%，这与径流弗洛德数减少有关；毁林翻耕后坡下、中上和坡中下段  $f$  减少了

41.3%~66.8%，而坡上段显著增加，约为林地原状下的 8 倍。加速侵蚀后阻力系数减少，水流克服阻力所消耗的能量减少，而用于侵蚀和泥沙运动的能量增大，导致坡面的侵蚀产沙量增加。

表 1 林地加速侵蚀对坡面径流水力学参数的影响

试验处理	断面	平均流速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	径流宽/ $10^{-2} \text{ m}$	径流深/ $10^{-2} \text{ m}$	雷诺系数 $R_e$	弗洛德数 $F_r$	阻力系数 $f$
原状	原状	0.07	7.57	0.240	160.8	0.44	19.56
	坡下段	0.14	6.50	0.396	555.0	0.71	7.40
除枯枝落叶层	中下段	0.10	7.00	0.507	506.9	0.45	18.55
	中上段	0.19	7.39	0.274	521.4	1.16	2.78
除地上部分	坡上段	0.19	8.92	0.182	345.7	1.42	1.84
	坡下段	0.07	7.01	0.970	678.9	0.23	72.42
	中下段	0.10	8.27	0.970	969.9	0.32	35.49
	中上段	0.18	10.01	0.994	1 789.6	0.58	11.23
翻耕	坡上段	0.22	10.67	0.351	772.0	1.19	2.65
	坡下段	0.04	5.67	0.789	315.6	0.14	180.41
	中下段	0.13	6.60	0.530	688.8	0.57	11.47
	中上段	0.15	7.38	0.150	224.3	1.24	2.43
	坡上段	0.15	7.31	0.400	599.5	0.76	6.50

### 2.3 坡面能量变化过程

降雨开始后，土壤侵蚀过程雨滴的能量包括初始势能和径流从坡顶端到坡底端所具有的势能，径流流经坡面从重力势能转化为动能，同时克服阻力，携带泥沙颗粒等消耗一部分能量。

根据径流流速、坡面坡度和流量和产沙量等测定数据计算林地加速侵蚀后的径流能量，根据能量守恒定律，不考虑复杂的侵蚀能量消耗过程，利用

侵蚀的初始和最终状态来计算径流能量消耗。坡面能耗过程与径流含沙量过程的变化趋势基本一致（图 2）。

坡面除枯枝落叶层、除地上部分和翻耕加速侵蚀后，坡面能耗增大，侵蚀量与能耗相关性较好；但原状下相关性弱于去除加速侵蚀处理，这可能与原状处理条件下，径流能量不但用于侵蚀产沙，同时克服草被对径流的阻力消耗有关。其结果有待于进一步研究。

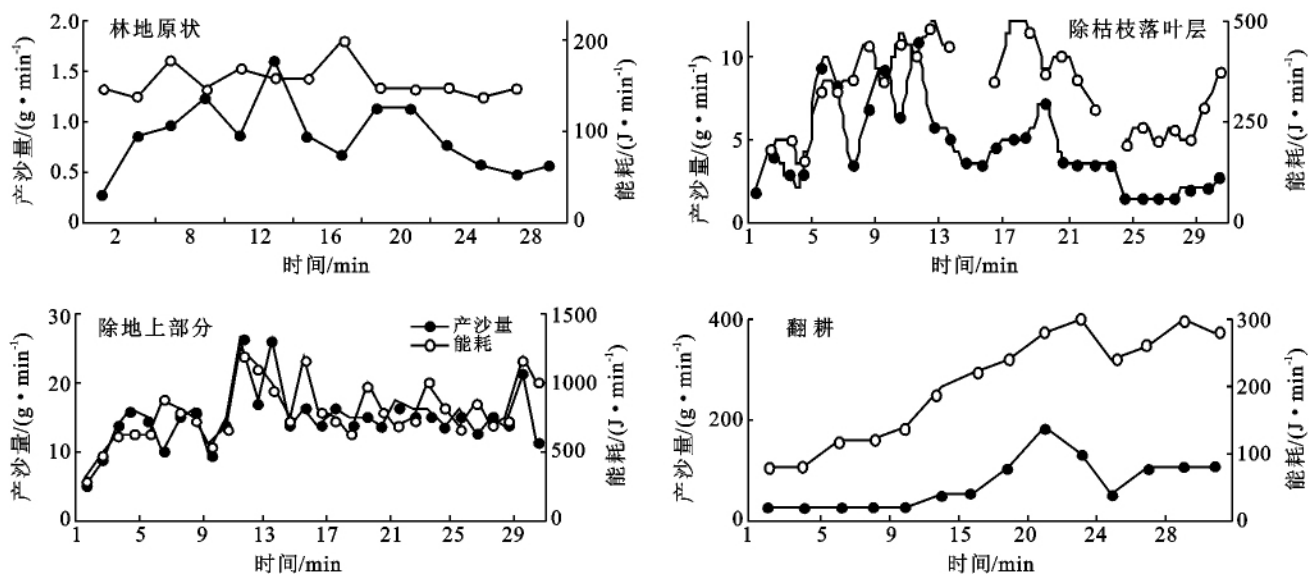


图 2 加速侵蚀产沙量和径流能耗的关系

### 3 结论

(1) 试验雨强条件下,坡面径流在重力的作用下,受到草的阻力减少,坡面流速自上断面至下断面有增加的趋势。林地原状下延缓径流的作用显著,除地上部分和除枯枝落叶层后流速均增加;翻耕后径流流速有所减缓。

(2) 林地原状  $R_e$  为 160.8,属于层流;加速侵蚀后坡面  $R_e$  显著增加,处于层流与紊流之间的过渡流状态。与原状相比,去除枯枝落叶层和除地上部分  $R_e$  分别增加了 114.9%~245.1%和 322.2%~1 012.9%。毁林翻耕后在坡中下和中上段产沙侵蚀沟,单宽流量变大,水力学半径减少,所以雷诺数也呈减小趋势。

(3) 林地除枯枝落叶层后  $F_r$  均增加,坡中下和下段  $F_r$  均大于 1,为急流,上和上中段  $F_r$  均小于 1,为缓流。与原状下相比,翻耕后除坡上段减少了 67.3%,坡上、中上和 中下段增加了 29.7%~181.6%,其中上段为急流。

(4) 原状下阻力系数高达 19.56,除枯枝落叶层后  $f$  减少 5.2%~90.6%,且坡的坡上阻力系数大于下部;除地上部分后,坡中下和下段  $f$  减少了 86.4%和 42.6%,上段和中上段增加了 81.4%和 270.3%;毁林翻耕后坡上、中上和 中下段  $f$  减少了 41.3%~66.8%,而坡上段显著增加,约为林地原状下的 8 倍。

(5) 在降雨初期动能较低,随降雨历时的增加呈缓慢上升,最后趋于稳定,且径流势能远大于径流动能。坡面除枯枝落叶层、除地上部分和翻耕加速侵蚀后,坡面能耗增大,侵蚀量与能耗相关性较好。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] 张光辉. 坡面水蚀水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001,12(3):395-402.
- [3] 李占斌,朱冰冰,李鹏,等. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报,2008,45(5):802-810.
- [4] Dunkerley D. Flow threads in surface run-off: Implications for the assessment of flow properties and friction coefficients in soil erosion and hydraulics investigations [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(8):1011-1026.
- [5] Lei Tingwu, Pan Yinghua, Liu Han, et al. A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts [J]. J. Hydrol., 2006, 319(1/4):216-226.
- [6] 丁文峰,李占斌,鲁克新,等. 坡面细沟发生临界水动力条件初探[J]. 土壤学报,2003,40(6):822-828.
- [7] 潘成忠,上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展,2007,18(4):490-495.
- [8] 郑良勇,李占斌,李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J]. 水利学报,2004(5):46-51.
- [9] 潘成忠,上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报 2009,17(6):843-851.
- [10] 吴普特,周佩华. 坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究[J]. 水土保持学报,1992,6(1):16-24,39.
- [11] 管新建,李占斌,王民,等. 坡面径流水蚀动力参数室内试验及模糊贴度分析[J]. 农业工程学报,2007,23(6):1-6.
- [12] 李鹏,李占斌,郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):444-449.
- [13] 张志玲,范昊明,郭成久,等. 模拟降雨条件下坡面水流流速与径流输出特征研究[J]. 水土保持研究,2008,12(6):32-34.
- [14] 刘秉正,吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安:陕西人民出版社,1997.
- [15] 李占斌,鲁克新,丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报,2002,16(2):5-8.
- [16] Li Zhanbin, Lu Kexin, Ding Wenfeng. Study on the dynamic process of rill erosion of loess slope surface [J]. International Journal of Sediment Research, 2001, 16(1):308-314.