

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.004

不同雨强下土壤大孔隙对坡面流水动力学参数的影响

张小娜¹, 冯杰², 张超³, 高玉芳⁴

(1. 南京信息工程大学水文气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100044;
3. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 4. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044)

摘要:以室内试验槽为平台, 利用人工模拟降雨试验, 定量分析了坡度为 5° 时, 在 30 mm/h, 60 mm/h 和 120 mm/h 降雨强度下, 有大孔隙试验槽和无大孔隙试验槽坡面流的水动力学参数的异同点. 结果表明, 各场次降雨的两坡面流的流态均为层流, 除降雨强度为 30 mm/h 时, 无大孔隙坡面的坡面流为急流外, 其他场次的水流均为缓流. 在同一降雨强度下, 相对于无大孔隙坡面, 有大孔隙坡面的坡面流流速、单宽流量、弗劳德数和雷诺数较小, 径流深、径流切应力、水流运动阻力以及坡面糙率较大. 随着降雨强度的增大, 两坡面的径流深和单宽流量增加, 坡面流流速、径流切应力和雷诺数均增大, 阻力系数和曼宁糙率均呈现先增大后减小的趋势, 弗劳德数则呈现先减小后增大的趋势.

关键词:降雨强度; 土壤大孔隙; 坡面流; 水动力学参数

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2012)03-0264-06

Influence of soil macropore on hydrodynamic parameters of overland flow with different rainfall intensities

ZHNAG Xiao-na¹, FENG Jie², ZHANG Chao³, GAO Yu-fang⁴

- (1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;
3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Department of Applied Meteorological Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Through laboratory experiments performed in two tanks, the hydrodynamic parameters of the overland flow of the tanks with macropores and without macropores were quantitatively analyzed using simulated rainfall with rainfall intensities of 30 mm/h, 60 mm/h, and 120 mm/h, at a slope gradient of 5°. The results show that the patterns of the overland flow along the two slopes were laminar flow in all rainfall events, and the overland flow along the slope without macropores was almost tranquil flow except with the rainfall intensity of 30 mm/h, when the overland flow was torrential flow. With the same rainfall intensity, the overland flow along the slope with macropores had a lower flow velocity, unit width discharge, Froude number, and Reynolds number, and a higher runoff depth, runoff shear stress, resistance coefficient, and Manning roughness, compared with that along the slope without macropores. For both slopes, with the increase of rainfall intensity, the runoff depth, unit width discharge, flow velocity, runoff shear stress, and Reynolds number increased, and the resistance coefficient and Manning roughness initially increased and then decreased, while the Froude number initially decreased and then increased.

Key words: rainfall intensity; soil macropore; overland flow; hydrodynamic parameter

收稿日期: 2011-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(41105077); 江苏省高校自然科学基金基础研究资助项目(11KJB170008); 南京信息工程大学科研基金(S8110144001)

作者简介: 张小娜(1981—), 女, 河南南阳人, 讲师, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究. E-mail: znanaxiao86@163.com

近几十年来, 坡面流的研究已逐步由以往的经验性分析发展到以动力学特征为主的机理研究, 其中主要包括对坡面流的水动力学特性、运动方程以及运动规律的研究^[1-14]。虽然研究年代已久, 但由于坡面流的复杂性, 目前对坡面流规律的认识仍不充分。研究坡面流水动力学特性及其运动规律, 对掌握土壤侵蚀发生、发展过程和改善生态环境等有重要的意义。

土壤的收缩和膨胀、土壤中可溶性物质的溶解、冻融的循环交替、耕种等物理过程以及蚯蚓和啮齿动物活动、植物根系的生长等生物过程的作用导致土壤中普遍存在大孔隙。大孔隙的存在, 改变了土壤水的运动规律, 间接影响了坡面流水动力学参数。本文采用室内人工模拟降雨试验的方法, 研究不同降雨强度下, 坡面流流速、径流深、单宽流量、径流切应力、雷诺数、弗劳德数、阻力系数和曼宁糙率随着降雨历时的动态变化过程, 试图得出不同降雨强度下土壤大孔隙对坡面流水动力学参数的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在 2 个可变坡度的试验槽(长 × 宽 × 高 = 2 m × 0.55 m × 0.35 m)内进行, 1 个试验槽无大孔隙, 1 个插入有人造大孔隙。人造大孔隙的分布见图 1(其中人造大孔隙的直径均为 8 mm, 图中的 5, 20, 30 代表大孔隙的深度为 5 cm, 20 cm, 30 cm)。土样为陕西杨凌重壤土。为准确模拟田间的实际状况, 采用分层取土法和分层填土法, 0~15 cm 为第 1 层, 15~30 cm 为第 2 层。2 层土壤的颗粒级配见表 1。利用陕西省杨凌黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的可控制降雨时间和强度的人工侧喷降雨装置, 分别在 3 种降雨强度(30 mm/h, 60 mm/h 和 120 mm/h)下, 对两槽实施人工降雨, 试验模拟降雨日期为 2007 年 10—11 月, 坡度设为 5°, 降雨历时 1 h。

表 1 土壤的颗粒级配

Table 1 Particle size distribution of soil

深度/cm	土壤不同直径颗粒所占的百分比/%					
	粒径 1~0.25 mm	粒径 0.25~0.05 mm	粒径 0.05~0.01 mm	粒径 0.01~0.005 mm	粒径 0.005~0.001 mm	粒径 <0.001 mm
0~15	0.85	5.45	43.36	12.90	23.10	14.34
15~30	0.55	6.35	42.02	12.72	19.33	19.03

1.2 测定方法

地表径流、壤中流和地下径流的流量测定采用称重法。对地表径流每 3 min 观测 1 次并采样。地表径流含沙量通过烘干称重法测定。壤中流和地下径流的观测时间间隔是 10 min。采用染色剂法测定表层坡面流流速 V_s 。采用马泥沙粒径仪 MS2000 激光分析仪测定土壤颗粒直径。

1.3 计算方法

坡面流流速 V 、径流深 h 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、沿程阻力系数 f 、曼宁糙率 n 、单宽流量 q 以及径流切应力 τ 等水力要素是反映水动力学特征的主要指标。

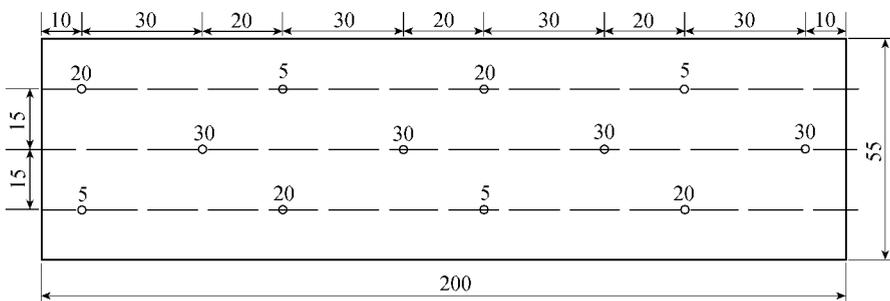


图 1 大孔隙分布平面图(单位: cm)

Fig. 1 Plan view of distribution of macropores(Unit: cm)

a. 坡面流流速 V 。采用实测值 V_s 作为计算坡面流流速的参考值, 通过水量平衡法得出净雨深 h_i 和净雨历时 t_c 。将净雨历时前的降雨量作为损失量, 用试算法求得稳定下渗率 f_c 。采用运动波法进行坡面汇流计算,

最后得出 V 试算法求 f_c 的公式为

$$f_c = y_{\text{下}} - \frac{\Delta h_{\text{下}}}{t_c - \Delta t_c}$$

式中: $y_{\text{下}}$ ——地下净雨量 μ ; $\Delta t_c, \Delta h_{\text{下}}$ ——净雨强度 r 小于 f_c 的时段及其雨量。

b. 径流深 h . 由于坡面流水层很薄, 一般在几毫米之内, 很难精确测定, 故采用下式进行计算:

$$h = \frac{q}{V}$$

其中

$$q = Q_s/B$$

式中: Q_s ——地面径流量 m^3/s ; B ——坡面宽度 m 。

c. 雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr . 在计算水流的雷诺数 $Re = VR/\nu$ 时, 考虑含沙量对水流运动黏滞系数的影响, 采用沙玉清公式^[15]对其进行修正:

$$\nu_m = \frac{\nu}{1 - S_v(2\sqrt{d_{50}})}$$

式中: ν_m, ν ——含沙水流和清水的运动黏滞系数 m^2/s ; S_v ——体积含沙量百分数; d_{50} ——泥沙的中值粒径, mm ; R ——水力半径, 可用径流深 h 近似表示。

纲量为 1 的弗劳德数 Fr 之间采用下式计算:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

式中 g 为重力加速度。

d. 阻力系数 f . 取用 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 表示阻力坡度 S_f , 则

$$S_f = \frac{fV^2}{8gh}$$

根据坡面流运动方程知 均匀流时, 有 $S_0 = S_f$. 所以阻力系数 f 采用下式计算:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2}$$

式中: R ——平均水力半径 m ; J ——水流能坡. 由于对坡面流速作平均化处理, J 可采用坡面比降直接计算。

e. 曼宁糙率 n . 计算公式为

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}}J^{\frac{1}{2}}}{V}$$

f. 径流切应力 τ . 计算公式为

$$\tau = \rho gRJ$$

式中 ρ 为水体密度。

g. 大孔隙对坡面流水动力学参数的影响程度 fd_c . 计算公式为

$$fd_c = \frac{|c_{\text{有}} - c_{\text{无}}|}{c_{\text{无}}} \times 100\%$$

式中: 下标 c ——坡面流水动力学参数; $c_{\text{有}}, c_{\text{无}}$ ——有大孔隙坡面和无大孔隙坡面的水动力学参数平均值。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度下大孔隙对坡面流流速和径流深的影响

两类坡面的 V 和 h 随着降雨历时的动态变化过程见图 2(a) 和图 2(b). 大孔隙的存在, 一方面使得水沿着大孔隙快速运移到达土壤深处或地下水中, 地面径流量减小, 地面 h 降低; 另一方面增加了坡面流沿程阻力, V 减小, 相应地面 h 增加. 从图 2(a) 和图 2(b) 可以看出 (a) 在同一降雨强度下, 有大孔隙坡面 h 较无大孔隙坡面 h 大, 但 V 明显较无大孔隙 V 小. 具体来说, 降雨强度为 30mm/h 时, 两坡面的平均 V 和 h 分别相差 0.0132m/s 、 0.0349mm ; 降雨强度为 60mm/h 时, 分别相差 0.0125m/s 、 0.0613mm ; 降雨强度为 120mm/h 时, 分别相差 0.0143m/s 、 0.0792mm . 说明大孔隙有增加径流深和减小坡面流流速的作用. 从表 2 可以看出, fd_v

和 fd_h 随降雨强度的增大而减弱。径流深的增加会使地面径流具有的能量增加, 但坡面流流速的减小又使得地面径流具有的能量减小。(b) 两坡面的 V 随着降雨强度的增大而增大, h 随着降雨强度的增大而增加, 这意味着降雨强度的增大使得两坡面的径流能量增加, 从而使得两坡面的输沙能力增强。

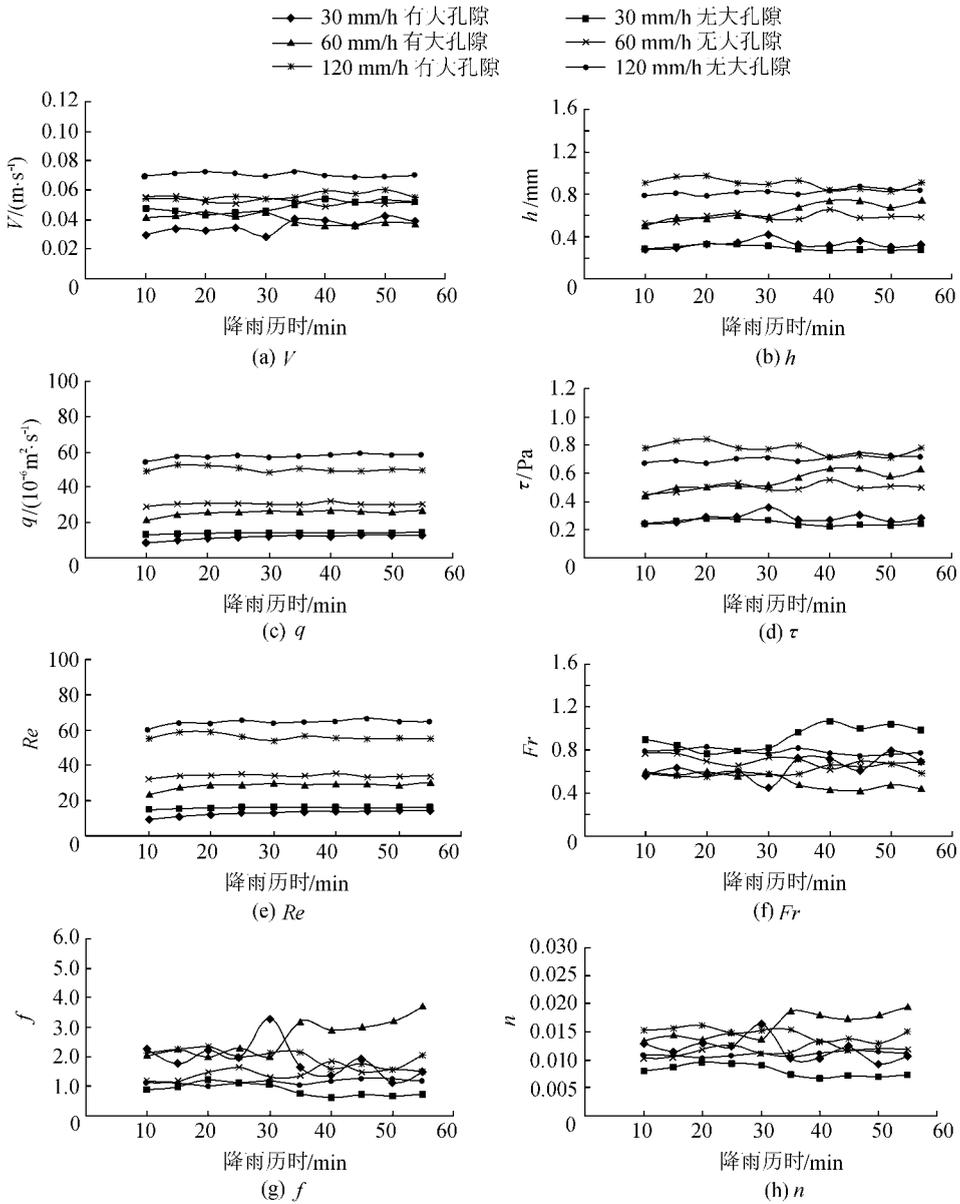


图 2 各坡面流水动力学参数随降雨历时的动态变化

Fig. 2 Dynamic variations of hydrodynamic parameters of overland flow according to change of rainfall duration

表 2 大孔隙对坡面流水动力学参数的影响程度

Table 2 Influence of soil macropore on hydrodynamic parameters

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	影响程度/%							
	fd_V	fd_h	fd_q	fd_τ	fd_{Re}	fd_{Fr}	fd_f	fd_n
30	27.2200	11.9978	18.4698	11.9978	18.4698	31.0623	118.6041	48.3880
60	23.8660	10.5814	16.3593	10.5814	16.3593	27.0468	82.7805	38.2365
120	20.4210	9.6536	12.8820	9.6536	12.8825	23.8967	74.3519	33.9142

注: fd_V , fd_h , fd_q , fd_τ , fd_{Re} , fd_{Fr} , fd_f , fd_n 分别为大孔隙对坡面流流速 V 、径流深 h 、单宽流量 q 、径流切应力 τ 、雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、沿程阻力系数 f 、曼宁糙率 n 的影响程度, 公式参见 fd_c 。

2.2 不同降雨强度下大孔隙对单宽流量及径流切应力的影响分析

不同降雨强度下两坡面单宽流量 q 随降雨历时的动态变化过程见图 2(c)。从图 2(c) 可以看出, 在同一

降雨强度下,有大孔隙坡面的 q 较无大孔隙坡面的 q 小,这是由于对于有大孔隙坡面,降雨初期,相当一部分降水被大孔隙拦蓄,使得下渗量增加,地面径流量减少,相应 q 减少.经计算,降雨强度为 30 mm/h, 60 mm/h, 120 mm/h 时,平均 q 减少量分别为 $2.5968 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $4.9781 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $7.4162 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. 不同降雨强度下两坡面 τ 随降雨历时的动态变化见图 2(d). 从图 2(d)可以看出,两坡面的 τ 均随降雨强度的增大而增大,且有大孔隙坡面的 τ 随降雨强度增大的幅度较大.同一降雨强度下,有大孔隙坡面的 τ 较无大孔隙坡面的 τ 大.分析其原因,在相同降雨强度下,有大孔隙坡面的 h 较无大孔隙坡面 h 大,使得相应水力半径 R 较大, τ 增大.降雨强度为 30 mm/h, 60 mm/h, 120 mm/h 时, τ 增加量分别为 0.029 89 Pa, 0.052 61 Pa, 0.067 92 Pa,说明大孔隙增大 τ 的能力随着降雨强度的增大而减弱.

2.3 不同降雨强度下大孔隙对坡面流流态参数的影响

Re 是水流流速和水力半径的函数,是水流的惯性力与黏滞力之比值,是衡量水体紊动程度的主要指标. Re 的增大,也就是水力侵蚀能力和搬运能力增大,会使坡面侵蚀产沙量增加.图 2(e)是坡面流 Re 随降雨历时的动态变化过程.从图 2(e)可以看出:(a)各场次降雨坡面流的 Re 均在 70 以下,表明在 3 种降雨强度下,坡面流流态为层流,此时水流黏滞力的作用较强,而紊动性较弱.(b)同一降雨强度下,大孔隙的存在使得坡面流流速减小、径流深增加.这 2 种作用对比的结果使得有大孔隙坡面坡面流的 Re 较无大孔隙坡面坡面流的 Re 小. Re 较小说明大孔隙的存在,一方面降低了坡面径流的紊动性,另一方面使得坡面侵蚀产沙量减少.大孔隙降低坡面径流紊动性大小的作用程度见表 2.从表 2 可以看出,随着降雨强度的增大,这种作用表现出减弱的趋势.(c)两坡面流的 Re 均随着降雨强度的增大而增大.

Fr 是水流惯性力和重力的比值,它反映了流速和水深的对比关系,是表征水流流态为急流或缓流的指标.本文各试验各场次降雨的坡面流 Fr 变化过程见图 2(f).从图 2(f)可以看出:(a)除降雨强度为 30 mm/h 时,无大孔隙坡面的 Fr 大于 0.8,其余场次的均小于 0.8.对于含沙水流,通常认为 Fr 的临界值为 $0.8 \sim 1.0$ ^[8].参照此判断标准,除降雨强度为 30 mm/h 时,无大孔隙坡面坡面流为急流外,其他场次的水流均为缓流.(b)同一降雨强度下,有大孔隙坡面坡面流的 Fr 较无大孔隙坡面坡面流的 Fr 小.说明在径流重力和水流惯性力的对比关系中,相对于无大孔隙坡面坡面流,有大孔隙坡面坡面流的径流重力占的比例较大.(c)随着降雨强度的增大,两坡面的 Fr 都呈现出先减小后增大的趋势.

2.4 不同降雨强度下大孔隙对阻力系数和曼宁糙率的影响分析

阻力系数 f 是指水流在沿坡流动过程中受到的来自水土界面摩擦力的阻滞作用和水流内部质点紊动所产生的阻碍水流运动的力的总称^[12],反映了坡面含沙水流在运动中所受的阻力大小.不同降雨强度下两坡面 f 在 0.6114 ~ 3.2874 之间变化.坡面曼宁糙率 n 是衡量坡面糙率情况的一个综合性系数,不同降雨强度下两坡面 n 在 0.0066 ~ 0.0193 之间变化.从图 2(g)和图 2(h)可以看出:同一降雨强度下,有大孔隙坡面坡面流的 f 和 n 远较无大孔隙坡面坡面流的 f 和 n 大.从表 2 可以看出,不同降雨强度下大孔隙阻止坡面含沙水流运动的程度和增加坡面曼宁糙率的程度均随降雨强度的增大呈现出减弱的趋势.随着降雨强度的增大,两坡面的 f 和 n 都呈现先增大后减小的趋势.

3 结 论

a. 大孔隙的存在,增大了径流切应力、阻力系数和曼宁糙率,增加了坡面径流深,减小了单宽流量、坡面流流速、雷诺数和弗劳德数.

b. 随着降雨强度的增大,两坡面的径流深和单宽流量增加,坡面流流速、径流切应力和雷诺数均增大,阻力系数和曼宁糙率均呈现先增大后减小的趋势,弗劳德数则呈现先减小后增大的趋势.

c. 各场次降雨坡面流的雷诺数均小于 70,流态均为层流.除降雨强度为 30 mm/h 时,无大孔隙坡面坡面流为急流外,其他场次的水流均为缓流.

本文仅探讨了坡度为 5° 时不同降雨强度下大孔隙对坡面流水力参数的影响.坡度不同,土壤大孔隙对这些参数的影响有所不同.

参考文献:

[1] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(1)坡面流[J].力学进展,2004,34(3):360-372.(LIU Qing-quan, LI Jia-

- chun ,CHEN Li ,et al. Dynamics of overland flow and soil erosion (I)-overland flow[J]. Advances in Mechanics ,2004 ,34(3) :360-372. (in Chinese)
- [2] 李毅 ,邵明安. 草地覆盖坡面流水动力参数的室内降雨试验[J]. 农业工程学报 ,2008 ,24(10) :1-5. (LI Yi ,SHAO Ming-an. Hydro-dynamic parameters of overland flow during laboratory rainfall experiments under grass coverage[J]. Transaction of the CSAE , 2008 ,24(10) :1-5. (in Chinese))
- [3] PAN C Z ,SHANGGUAN Z P ,LEI T W. Influences of grass and moss on runoff and sediment yield on sloped loess surfaces under simulated rainfall[J]. Hydrological Processes ,2006 ,20 :3815-3824.
- [4] ABRAMHAMS A D ,PARSON A J. Resistance to overland flow on desert pavement and its implications for sediment transport modeling [J]. Water Resources Research ,1991 ,27 :1827-1836.
- [5] OELZE M L ,SABATIER J M ,RASPECT R. Roughness measurements of soil surface by acoustic backscatter[J]. Soil Science Society of America Journal ,2003 ,67 :241-250.
- [6] STEPHAN U ,GUTKNECHT D. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydrology ,2002 ,269 :27-43.
- [7] LAWRENCE D S L. Hydraulic resistance in overland flow during partial and marginal surface inundation :experimental observations and modeling[J]. Water Resource Research ,2000 ,36(8) :2381-2393.
- [8] 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. (PAN Cheng-zhong ,SHANGGUAN Zhou-ping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention[J]. Advances in Water Science ,2007 ,18(4) :490-495. (in Chinese))
- [9] LI G ,ABRAHAMS A D ,ATKINSON J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth Surface Processes Landforms ,1996 ,21 :509-515.
- [10] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的研究实验[J]. 水科学进展 ,2002 ,13(2) :159-165. (ZHANG Guang-hui. Study on hydraulic properties of shall flow[J]. Advances in Water Science ,2002 ,13(2) :159-165. (in Chinese))
- [11] 敬向峰 ,吕宏兴 ,潘成忠 ,等. 坡面薄层水流流态判定方法的初步探讨[J]. 农业工程学报 ,2007 ,23(5) :56-61. (JING Xiang-feng ,LV Hong-xing ,PAN Cheng-zhong ,et al. Preliminary study on flow pattern determinant method of shallow on slope surface[J]. Transactions of the CSAE ,2007 ,23(5) :56-61. (in Chinese))
- [12] 肖培青 ,郑粉莉 ,姚文艺. 坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J]. 水科学进展 ,2009 ,20(3) :236-240. (XIAO Pei-qing ,ZHENG Fen-li ,YAO Wen-yi. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gullyslope system[J]. Advance in Water Science ,2009 ,20(3) :236-240. (in Chinese))
- [13] 张小娜 ,冯杰 ,邵伟. 不同雨强下植被对坡地产汇流及溶质运移的影响[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2010 ,38(3) :246-251. (ZHANG Xiao-na ,FENG Jie ,SHAO Wei. Influence of vegetation on overland runoff generation ,flow concentration and solute transport under different rainfall intensities[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2010 ,38(3) :246-251. (in Chinese))
- [14] 芮孝芳 ,刘方贵 ,邢贞相. 水文学的发展及其所面临的若干前沿科学问题[J]. 水利水电科技进展 ,2007 ,27(1) :75-79. (RUI Xiao-fang ,LIU Fang-gui ,XING Zhen-xiang. Advances in hydrology and some frontier problems[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2007 ,27(1) :75-79. (in Chinese))
- [15] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京 :中国工业出版社 ,1965.