

黄土坡面细沟水流流速试验研究

焦念^{1,3}, 王占礼^{2,3}, 刘俊娥^{1,3}, 谭贞学⁴, 王莎^{1,3}, 申楠^{1,3}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 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 杨凌 712100; 4. 钦州市 水土保持监测分站, 广西 钦州 535000)

摘 要: 流速是最基本、最重要的水流水力学参数之一, 阐明细沟水流流速变化的特征对于揭示坡面细沟侵蚀动力学过程机理具有重要作用。采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法, 对黄土坡面细沟水流流速进行了试验研究。结果表明: (1) 细沟径流流速随径流历时的变化过程在不同雨强下不断递减, 可用指数方程很好地描述, 递减速率在产流后 6 min 内较大, 以后减小, 各雨强下递减速率基本分别一致; (2) 细沟径流流速随径流历时的变化过程在不同坡度下也不断减小, 可用指数方程很好地描述, 各坡度下变化趋势一致, 整个径流过程中减小速率也基本一致; (3) 细沟水流平均流速随雨强增大而增大, 可用对数方程很好地描述; 随坡度增大而增大, 可用幂函数方程很好地描述; 随雨强及坡度的变化可用二元对数方程描述。

关键词: 黄土坡面; 细沟水流; 流速; 组合小区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0117-05

中图分类号: S157.1

Experimental Study of Rill Flow Velocity on Loess Hillslope

JIAO Nian^{1,3}, WANG Zhan-li^{2,3}, LIU Jun-e^{1,3}, TAN Zhen-xue⁴, WANG Sha^{1,3}, SHEN Nan^{1,3}

(1. School of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;
4. Qinzhou Branch Station of Soil and Water Conservation Monitoring, Qinzhou, Guangxi 535000, China)

Abstract: Flow velocity is one of the most basic and important hydraulic parameters. Clarifying the variation of rill flow velocity is of importance to reveal the mechanisms of dynamic rill erosion processes. Rill flow velocity on loess hillslope is studied through a multi-plot experiment under simulated rainfall with the addition of a steady in-flow at the top of the multi-plot system. The main findings are as follows: (1) Rill flow velocities for different rainfall intensities decrease with runoff duration, which can be well described by an exponential equation. The decrements are great 6 min after runoff generation and then decline. The tendencies are basically consistent for the decrements at different intensities. (2) Rill flow velocities for different slopes also decrease with runoff duration, which can be described by an exponential equation. The tendencies for the decrements on different slopes are consistent. The decrements are basically consistent during the whole runoff process. (3) The mean flow velocity increases with increased rainfall intensity, which can be well described by a logarithmic equation, and increases with increased slope steepness, which can be well described by a power equation. A dual logarithmic equation can be used to describe the variation of the mean flow velocity with rainfall intensity and slope.

Keywords: loess hillslope; rill flow; flow velocity; multi-plot

收稿日期: 2012-03-18

修回日期: 2012-05-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀动力学过程组合小区试验研究”(40971172); 国家自然科学基金项目“黄土坡面细沟侵蚀关键参数及其耦合关系试验研究”(41171227)

作者简介: 焦念(1989—), 女(汉族), 甘肃省镇原县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: jiaonian@nwsuaf.edu.cn。

通信作者: 王占礼(1960—), 男(汉族), 陕西省榆林市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn。

我国黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,其中,细沟侵蚀起了重要的影响作用。细沟侵蚀是黄土高原坡耕地严重土壤侵蚀的主要方式,是造成坡耕地表土和养分流失的重要原因^[1]。细沟侵蚀是在细沟水流动力作用下发生发展的,其中细沟水流的流速发挥着至关重要的作用。细沟水流流速是最基本、最重要的细沟水流水力学参数之一,是计算其他水力学参数的重要基础参数^[2]。细沟水流流速的大小变化直接影响着坡面细沟水流动力作用的强弱及相应的细沟侵蚀过程响应,因此,阐明细沟水流流速变化特征对于深入剖析细沟水流水力学特征,认识和揭示坡面细沟侵蚀动力学过程机理具有重要作用。

国内外学者对坡面流的水流流速进行了诸多研究。在国外,Guys 等^[3]对坡面流流速进行了系统研究,研究结果表明,坡面流流速不但随着坡度和单宽流量的增大而增大,而且水流容重和黏滞系数也对坡面流流速存在明显影响。侵蚀细沟出现以后,坡面流横向汇集,径流动力特征发生显著变化。但由于细沟水流特征较为复杂,因而研究较晚。1984 年 Foster 等^[4]首次利用模拟细沟研究了侵蚀细沟的流速分布特征,研究表明,流速沿细沟呈正态分布,流速主要受流量和坡度影响。1992 年 Govers^[5]通过系统的室内试验发现,当坡度为 $2^{\circ} \sim 8.1^{\circ}$,流量为 $(0.032 \sim 1.210) \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,对于粉壤土而言,细沟流流速仅为流量的函数。另外,Govers^[5]和 Giménez 等^[6]提出了径流流速与流量之间具有指数关系。在国内,徐在庸等^[7]利用人工降雨进行坡面流速试验得到了流速公式。江忠善^[8]在大量收集与分析国内外坡面流研究成果的基础上,根据不稳定流理论,所收集的资料和试验数据,得出了流速的拟合公式。张科利等^[9]通过放水冲刷试验,测定并研究了坡面细沟侵蚀中径流的水力要素特征及其相互关系,结果表明,黄土陡坡上细沟径流的流速与径流量和坡度之间有良好的关系。吴普特^[10-11]的研究表明坡面流流速与坡长之间符合指数关系。魏霞等^[12]研究表明相同流量下,坡沟系统的坡面径流流速沿程有先增大后减小的趋势,在从坡面向沟坡过渡时,各流量下的流速均达到极小值,进入沟坡以后,流速又开始增大。

综观上述国内外研究,针对黄土坡面细沟侵蚀过程中水流流速的研究甚少。本文采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验,分析研究黄土坡面细沟水流流速变化过程,以深入认识黄土坡面细沟侵蚀过程中的水流动力学特征,为进一步发展黄土坡面细沟侵蚀过程模型奠定基础,并为黄土坡面水土流失治理提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置与供试土壤

试验装置为自行设计加工的移动式变坡钢质组合小区,由 2 个小区组成(1 号,2 号),各小区长 80 cm,宽 50 cm,深 35 cm。1 号小区用于为 2 号小区中的细沟小区提供顶部汇流,置于 2 号小区上部;2 号小区紧接 1 号小区设置,装土时由两边向中间均匀倾斜 10° ,中间为 10 cm 宽度的细沟小区,用于观测具有细沟间区细沟中的总水过程,实现对黄土坡面一段细沟的径流变化过程观测与模拟。1 号,2 号 2 个小区之间用钢质封闭导流槽连接。为保证汇入流不造成冲刷,2 号小区在加工时长度作了适当延长,以使上端能有适当宽度的非土面水流缓冲带。试验用土取自位于黄土高原腹地的陕西安塞(属典型黄土高原丘陵沟壑区),土壤类型为黄绵土,试验前期土壤含水量为 14%,容重为 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

1.2 试验设计与观测

试验在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人工模拟降雨大厅进行。由于试验小区长度较短,为保证足够的降雨产流汇流流量,降雨产流开始时在 1 号小区上端同时进行 $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$ 的定流量放水,其作用相当于增加小区的坡长,使各场降雨试验的产流汇流流量统一提高同一等级(相当于注入稳定基流),而降雨产流汇流与定流量放水叠加形成的流量,其变化规律依然随降雨强度及坡度的改变而变化。试验设计坡度分别为 $9^{\circ}, 12^{\circ}, 15^{\circ}, 18^{\circ}, 21^{\circ}$,同时雨强为 $2 \text{ mm}/\text{min}$ 的试验 5 场;雨强分别为 $1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 \text{ mm}/\text{min}$,同时坡度为 15° 的试验 5 场,共进行 20 场试验(重复 1 次)。各场降雨在开始产流后统一降雨历时为 18.25 min。

为消除装土时表面留下的松土对水流的影响,试验在产流 0.25 min 后开始第 1 次流速观测,以后每隔 3 min 观测 1 次,直到降雨停止。各坡度雨强组合条件下不同径流时刻细沟小区中的细沟水流流速用高锰酸钾染色法测量,测流长度为整个细沟小区的长度,即 80 cm,进一步通过加权平均计算,则可取得一场降雨径流过程的细沟水流平均流速。

2 结果与分析

2.1 细沟水流流速随径流过程的变化

2.1.1 不同降雨强度下细沟水流流速随径流过程的变化 根据试验实测资料,将不同降雨强度下,细沟径流流速随径流过程的变化过程点绘在直角坐标系

中(如图 1 所示)。从图 1 中可以看出,不同降雨强度下,坡面细沟径流流速变化过程表现为随径流历时的增加而递减,在径流过程初期,细沟径流流速递减速率较快,开始产流的 6 min 后减小速率有所减缓,开始产流 6 min 前与后,各雨强下细沟径流流速递减速率基本分别一致。不同降雨强度条件下的细沟水流流速差异较小。

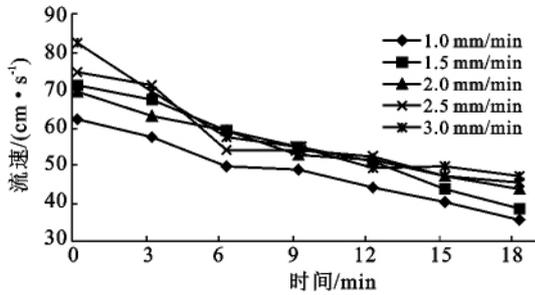


图 1 不同降雨强度下细沟水流流速随径流过程的变化

表 1 是不同雨强下细沟径流流速随径流过程变化的相关方程。从表 1 可以看出,坡面细沟径流流速随径流过程的变化可用指数方程很好地描述,相关关系高度显著。

表 1 不同雨强下细沟水流流速随径流过程变化的经验方程

雨强/ (mm·min ⁻¹)	坡度/ (°)	回归方程	决定系数 R ²	显著性水平
1.0	15	$y=62.858e^{-0.0302x}$	0.99	0.01
1.5	15	$y=74.212e^{-0.0343x}$	0.99	0.01
2.0	15	$y=69.143e^{-0.0254x}$	0.99	0.01
2.5	15	$y=72.787e^{-0.0279x}$	0.89	0.01
3.0	15	$y=75.752e^{-0.0298x}$	0.89	0.01

注:y 为流速(cm/s); x 为时间(min)。下同。

细沟径流流速变化过程表现为随径流历时增加而递减的原因是由细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流产生后,随径流及其侵蚀过程的进行,原先平整的细沟床面变得越来越粗糙崎岖,水流流动所受的阻力越来越大,且水流质点沿程流动经历的流程越来越长,由细沟沟头流出沟口需要的时间越来越多,加之,细沟侵蚀产生的泥沙在输出沟口过程中由于沟口基准面及出流畅通性的制约使少数泥沙在沟口附近沉积导致细沟床面的实际坡度越来越向减小的趋势微微改变,所以,流速必然越来越慢。虽然本试验中细沟径流率的变化过程是总体上先逐步增大随后转为稳定的变化过程^[13],但由于水流流动过程中的水深小,径流率变化对流速的推动作用不及细沟径流侵蚀导致的床面微地形改变对流速约束作用的功效,

整个径流过程中细沟床面糙度的变化主导了细沟水流流速的变化过程。开始产流后的 6 min 内细沟水流流速递减速率大与径流率逐步增大,6 min 以后细沟水流流速递减速率小与径流率转为稳定变化相对应^[13],说明细沟径流侵蚀导致的床面微地形变化可能对流速的变化起了制约作用,这也说明流速在细沟侵蚀过程中可能未发挥最本质性的水动力作用。

2.1.2 不同坡度下细沟水流流速随径流过程的变化

根据试验结果,不同坡度下,细沟径流流速随径流过程的变化如图 2 所示。由图 2 可知,不同坡度下,坡面细沟水流流速随径流历时的增长不断减小,且各坡度下变化趋势一致,整个径流过程中流速的减小速率也基本一致。不同坡度条件下的细沟水流流速差异也较小。通过对细沟径流流速统计分析得出,不同坡度条件下,坡面细沟径流流速随径流过程的变化也可用指数方程描述,且相关关系也高度显著,经验方程及检验结果见表 2。

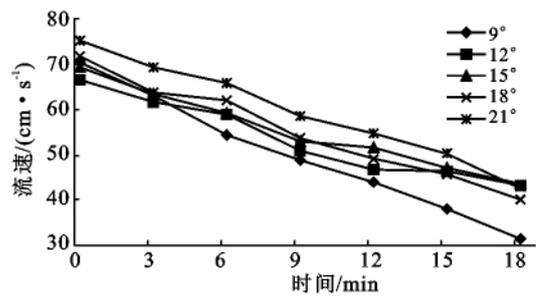


图 2 不同坡度下细沟水流流速随径流过程变化

表 2 不同坡度下细沟径流流速随径流过程变化的经验方程

雨强/ (mm·min ⁻¹)	坡度/ (°)	回归方程	决定系数 R ²	显著性水平
2.0	9	$y=72.316e^{-0.0437x}$	0.99	0.01
2.0	12	$y=66.696e^{-0.0253x}$	0.97	0.01
2.0	15	$y=69.143e^{-0.0254x}$	0.99	0.01
2.0	18	$y=72.584e^{-0.0316x}$	0.99	0.01
2.0	21	$y=77.359e^{-0.0301x}$	0.98	0.01

比较图 2 与图 1 可知,不同坡度下坡面细沟径流流速变化过程与不同降雨强度下坡面细沟径流流速变化过程具有很大的相似性,细沟径流流速都随径流过程的进行而减小。其主要差异在于,不同降雨强度下坡面细沟径流流速随径流过程的减小速率在产流后的 6 min 内较大,以后减小,而不同坡度下坡面细沟径流流速随径流过程的减小速率基本一致。

2.2 降雨强度对细沟水流流速的影响

将同坡度不同雨强下一次降雨径流过程的细沟水流平均流速点绘成图 3。并对细沟水流平均流速

与降雨强度关系的试验数据进行统计分析,取得如下经验方程及检验结果:

$$V = 8.5785 \ln I + 49.574 \quad (R^2 = 0.90, p = 0.025) \quad (1)$$

式中: V ——细沟水流平均流速 (cm/s); I ——雨强 (mm/min)。

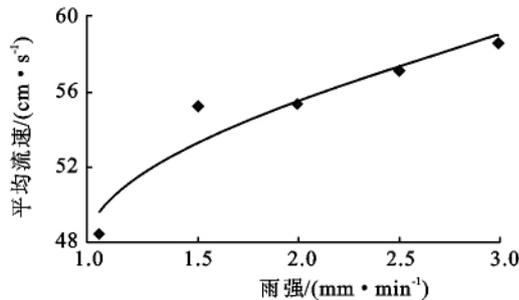


图 3 雨强对细沟水流平均流速的影响

从图 3 及式(1)可知,同坡度条件下,坡面细沟水流平均流速随雨强增大而增大,细沟水流平均流速随雨强的变化可用对数方程很好地描述。

同坡度不同雨强下,随雨强增大,由细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流,其径流深增大,径流在顺坡方向的分力增大,所以细沟水流的平均流速也就增大。

2.3 坡度对细沟水流流速的影响

将同雨强不同坡度下细沟水流平均流速试验观测数据点绘于坐标(图 4)。对同雨强下细沟水流平均流速随坡度的变化进行统计分析,取得平均流速与坡度之间统计关系,经验方程及检验结果如下:

$$V = 33.69S^{0.1811} \quad (R^2 = 0.91, p = 0.025) \quad (2)$$

式中: V ——细沟水流平均流速 (cm/s); S ——坡度 (°)。

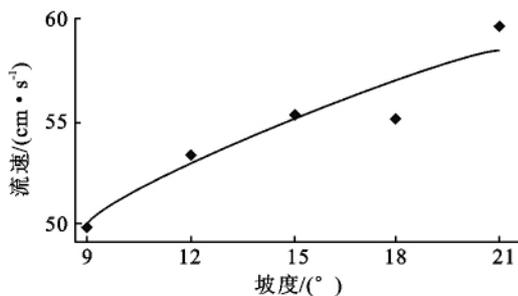


图 4 坡度对细沟水流流速的影响

从图 4 及式(2)可以看出,同雨强下,坡面细沟水流平均流速随坡度的增大而增大。细沟水流平均流速随坡度的变化可用幂函数方程很好地描述。

相同降雨强度下,随坡度增大,由细沟小区顶部汇入流、两侧细沟间汇入流及细沟承雨经入渗后产生的净雨共同形成的细沟径流,在顺坡方向的分力增大,所以细沟水流的平均流速也就相应增大。因此,坡面细沟水流平均流速随坡度的变化就表现为正相关关系。

2.4 降雨强度及坡度对细沟水流流速的影响

Foster 等^[14]研究认为,细沟流流速沿细沟的分布可假定符合正态分布(高斯分布),其特征可由 2 个参数均值和标准差来描述,并根据非线性回归分析,得到平均流速表达式为:

$$V = 16.0Q^{0.28}J^{0.48} \quad \text{或} \quad V = 121R^{0.73}J^{0.48} \quad (3)$$

式中: V ——平均流速; Q ——径流量 (ml); J ——坡降; R ——水力半径,取沿程各断面水力半径平均值。张科利等^[15]经过试验得出细沟流的平均流速与径流量和坡度之间有良好的关系,关系式为:

$$V = 5.544Q^{0.2636}S^{0.2513} \quad (4)$$

式中: V ——平均流速 (cm/s); Q ——径流量 (ml); S ——坡度 (°)。

本试验研究条件下,对具有定流量人工放水 and 不同坡度及不同雨强降雨下的坡面细沟水流平均流速与雨强及坡度之间的关系进行统计分析,取得的经验方程及检验结果为式(5):

$$V = 8.48 \ln I + 9.94 \ln S + 22.5 \quad (5)$$

$[R^2 = 0.90, F(2, 6) = 25.79 > F(2, 6)_{0.01} = 11.26]$

式中: V ——细沟水流平均流速 (cm/s); I ——雨强 (mm/min); S ——坡度 (°)。

由式(5)可知,坡面细沟径流平均流速随雨强及坡度的增加而增大。不同雨强及坡度下,坡面细沟径流平均流速随雨强及坡度的变化可用二元对数方程描述。由式(5)中雨强与坡度因子回归系数可知,本试验条件下坡度增大对细沟水流平均流速的影响略大于雨强增大对细沟水流平均流速的影响。

3 结论

本文采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法,对黄土坡面细沟水流流速进行了试验研究。

(1) 不同雨强下,细沟径流流速随径流历时的增加而递减,可用指数方程很好地描述,径流过程初期,流速递减速率较快,开始产流 6 min 后减小速率有所减缓,开始产流 6 min 前与后,各雨强下流速递减速率基本分别一致,各雨强下流速差异较小。

(2) 不同坡度下,细沟水流流速随径流历时的增

长不断减小,可用指数方程很好地描述,各坡度下变化趋势一致,整个径流过程中流速减低速率也基本一致,各坡度下流速差异较小。

(3) 不同坡度下细沟径流流速变化过程与不同雨强下具有很大相似性,流速都随径流过程的进行而减小。主要差异在于,不同雨强下流速随径流过程的减小速率在产流后的 6 min 内较大,以后减小,而不同坡度下的减小速率基本一致。

(4) 同坡度下,细沟水流平均流速随雨强增大而增大,可用对数方程描述。同雨强下,细沟水流平均流速随坡度的增大而增大,可用幂函数方程很好地描述。细沟径流平均流速随雨强及坡度的变化可用二元对数方程描述。

[参 考 文 献]

- [1] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998(1):52-59.
- [2] 夏卫生,雷廷武,赵军. 坡面侵蚀动力学及其相关参数的探讨[J]. 中国水土保持科学,2003,4(1):16-19.
- [3] Guy B T, Dickinson W T, Rudra R P. The roles of rain fall and runoff in the sediment transport capacity of inter rillflow[J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1378-1387.
- [4] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics I: Velocity relationships [J]. Transactions of ASAE, 1984,27(3):790-796.
- [5] Govers R. Relationship between discharge, velocity, and flow area for rills eroding in loose, non-layered materials[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1992,17(5):515-528.
- [6] Giménez R, Govers G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills[J]. Water Resources Research, 2001,37(3):791-799.
- [7] 徐在庸,胡玉山. 坡面径流的试验研究[J]. 水利学报, 1962(4):1-7.
- [8] 江忠善,宋文经. 坡面流速的试验研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊,1986(1):46-52.
- [9] 张科利,张竹梅. 坡面侵蚀过程中细沟水流动力学参数估算探讨[J]. 地理科学,2000,4(20):326-330.
- [10] 吴普特. 动力蚀能实验研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.
- [11] 田凯,李小青,鲁帆,等. 坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J]. 中国水土保持,2010(4):44-46.
- [12] 魏霞,李勋贵,李占斌,等. 黄土高原坡沟系统径流动力学特性试验[J]. 农业工程学报,2009,25(10):19-23.
- [13] 谭贞学,王占礼,谭晓,等. 黄土坡面细沟径流过程试验研究[J]. 中国水土保持科学,2010,8(5):24-29.
- [14] 于朋,雷孝章,陈平安,等. 坡面流水力特性研究的进展[J]. 四川水利,2009(4):40-43.
- [15] 张科利,唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报,2000,37(1):9-15.

(上接第 116 页)

(2) 从震后约 3 a 的降雨滑坡活动特征来看,特大型滑坡较少,以中小型滑坡为主,尤其是小型的塌滑最为典型且数量多,以表层堆积层或土质类滑坡为主,而岩质滑坡相对较少。

(3) 从震后滑坡的发展趋势来看,汶川地震发生后的前期,主要表现为一些震松坡体和一些裂隙坡体在降雨作用下产生的中小型滑塌灾害,大型、特大型滑坡则较少,后期中小型滑塌灾害会逐渐减少,但大型或特大型滑坡则可能有增加的趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 陈晓利,叶洪,程菊红. GIS技术在区域地震滑坡危险性预测中的应用:以龙陵地震滑坡为例[J]. 工程地质学报. 2006,14(03):333-336.
- [2] Cui Peng, Chen Xiaoqing, Zhu Yingyan, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan Province, China, and resulting geohazards [J]. Nat Hazards. 2011,56:19-36.
- [3] 崔鹏,陈树群,苏凤环,等. 台湾“莫拉克”台风诱发山地灾害成因与启示[J]. 山地学报,2010,28(1):103-115.
- [4] 唐川,齐信,丁军,等. 汶川地震高烈度区暴雨滑坡活动的遥感动态分析[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2010,35(2):317-323.
- [5] 乔建平,杨宗信,田宏岭,等. 汶川“5·12”大地震后降雨对滑坡的影响[OL]. (2009-09-25). http://www.sc.gov.cn/zw/gk/zwdt/bmdt/201009/t20100922_1032110.shtml.
- [6] Yang Zongji, Qiao Jian ping, Tian Hongling, et al. Epicentral distance and impacts of rainfall on geohazards after the "5·12" Wenchuan earthquake[J]. China. Disaster Advances, 2010,3(4):151-156.
- [7] 崔鹏,韦方强,陈晓清,等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊,2008,23(4):317-323.
- [8] 崔鹏,韦方强,何思明,等. 5.12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报. 2008,26(3):280-282.
- [9] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.