黄土坡面细沟水流阻力的试验研究

申 楠[1,3], 王占礼[2,3], 刘俊娥[1,3], 谭贞学[4], 王 莎[1,3], 焦 念[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: 水流阻力是重要的水力学参数之一,阐明细沟水流阻力系数变化特征对于认识细沟水流水力学性质及细沟侵蚀动力学过程机理具有重要意义。采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法,对黄土坡面细沟侵蚀过程中的水流阻力进行了试验研究。结果表明:(1) 细沟水流阻力系数随径流历时的变化,在不同雨强条件下不断增加,增大趋势总体一致,产流 15 min 后增速出现差异,可用指数方程很好地描述。(2) 细沟水流阻力系数随径流历时的变化,在不同坡度条件下也不断增大,变化过程总体一致,产流 15 min 后增速也出现差异,可用指数方程很好地描述,不同坡度下阻力系数差异较不同雨强下稍大。(3) 细沟水流平均阻力系数随雨强增大而减小,可用对数方程进行描述;随坡度增大而增大,但增幅很小,可用指数方程描述;随雨强与坡度的变化可用二元指数方程描述。

关键词: 黄土坡面; 细沟水流; 水流阻力; 阻力系数

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2012)06-0034-04 **中图分类号**: S157.1

Experimental Study of Rill Flow Resistance on Loess Hillslope

SHEN Nan[1,3], WANG Zhan-li[2,3], LIU Jun-e[1,3], TAN Zhen-xue[4], WANG Sha[1,3], JIAO Nian[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: Water flow resistance is one of the important hydraulic parameters. Elucidating the variations of rill flow resistance coefficient is critical to understand the hydraulic properties of rill flow and the mechanisms of dynamic rill erosion process. The flow resistance involved in rill erosion processes on loess hillslope was studied by a multi-plot experiment under simulated rainfall with addition of steady in-flow through the tops of the plots. The results showed that rill flow resistance coefficients for different rainfall intensities showed a consistently increasing tendency increase with runoff duration. Fifteen minutes after the initiation of runoff, the increasing trend changed and could be well described by an exponential equation. The resistance coefficients for different slopes exhibited the exactly same trend. The average resistance coefficient of rill flow decreased with increasing rainfall intensity, which can be described by a logarithmic equation, while it increased slightly with increasing slope steepness, which can be described by an exponential equation. A dual exponential equation can be used to describe the variations of the average resistance coefficient with various rainfall intensity and slope steepness.

Keywords: loess hillslope; rill flow; flow resistance; resistance coefficient

黄土高原地区是我国乃至世界上土壤侵蚀最严重的区域,严重的土壤侵蚀给该区域的可持续发展及黄河下游两岸的安全造成了严重影响与威胁,而细沟侵蚀则是该地区坡面最主要的侵蚀过程之一,是坡面严

收稿日期:2012-03-18 **修回日期**:2012-07-05

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:申楠(1988—),女(汉族),陕西省渭南市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail:shennan@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。

重侵蚀的主要方式和强烈侵蚀产沙的重要根源。坡面细沟侵蚀发生发展过程中,细沟径流的流动必然会受到来自细沟水土界面的摩擦阻滞作用和细沟水流内部质点的紊动等所产生的阻碍细沟水流运动的阻力。水流所受阻力的大小不仅直接影响径流速度,而且还关系到径流对土壤的有效侵蚀力[1]。因此,土壤侵蚀的强烈程度与水流阻力密切相关,研究水流阻力对控制土壤侵蚀至关重要。从能量角度分析,水流阻力主要来自 3 个方面:(1) 沙粒本身对水流的阻碍作用;(2) 沟槽形态对水流的阻碍作用;(3) 水流所挟带泥沙的影响。由于在侵蚀发生过程中,上述 3 种作用都与水流强度有很大的关系,水流强度又在很大程度上决定于流量和坡度的变化,所以,细沟水流所受的阻力也必然与其流量和坡度大小密切相关[2]。阻力系数是表征水流阻力大小的水力学参数,Darcy—Weisbach 阻力系数是普遍采用的表征水流阻力特征的水力参数,它反映了下垫面等因素对流动水体的阻力大小,是坡面细沟水流水力学重要的参数之一。在流量、坡度等水动力条件相同的情况下,阻力系数越大,水流克服阻力所消耗的能量越多,则水流用于侵蚀和输移泥沙的能量越小,土壤侵蚀就越微弱,反之则土壤侵蚀剧烈[3]。阻力系数的大小受到坡度等外在条件的影响,同时其大小也影响着坡面细沟水流的动力作用及其侵蚀过程。因此,阐明黄土坡面细沟水流阻力系数变化特征对于认识黄土坡面细沟水流水力学性质及细沟侵蚀动力学过程机理具有重要意义,并可为黄土坡面水土流失治理提供重要科学依据。

国内外诸多学者对水流阻力进行了大量的研究[4-16],但多以缓坡度及坡面流径流冲刷试验居多,并得出了不同的结果。本研究通过采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法,研究黄土坡面细沟侵蚀过程中水流阻力变化规律,以期深入认识黄土坡面细沟水流水力学性质,进一步揭示黄土坡面细沟侵蚀动力学过程的机理。

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(图 1),由两个小区组成(1 号、2 号),小区规格均为: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流过程,实现对黄土坡面一段细沟的径流变化过程的观测与模拟。1 号和 2 号两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进行了适当延长,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省安塞县(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 g/cm^3。

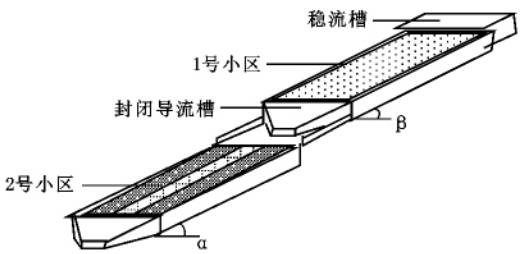


图 1　组合小区试验布设示意图

1.2　试验设计与观测计算

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 m^3/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°,12°,15°,18°,21°,同时雨强为 2 mm/min 的试验 5 场,雨强分别为:1.0,1.5,2.0,2.5 和 3.0 mm/min,同时坡度为 15°的试验 5 场,共进行 20 场试验(1 次重复)。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 后开始第一次观测,以后每隔 3 min 观测一次,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。各次细沟水沙观测则皆通过与流速观测同步的计时计容取浑水样进行,并通过测定含沙量及泥沙密度,计算出相应的细沟清水径流流量,结合细沟水流流速计算出细沟水深。在观测得到细沟水流流速及水深的基础上,通过公式(1)计算出不同径流时刻细沟水流的 Darcy—Weisbach 阻力系数:

$$f=\frac{8gRJ}{V^2} \tag{1}$$

式中:f——Darcy—Weisbach 阻力系数(无量纲);g——重力加速度,$g=9.8$ m/s^2;R——水力半径(m),对于本试验中的矩形细沟水流断面,$R=hb/(2h$

$+b)$，其中，h 为细沟水深(m)，b 为细沟水宽(m)；J——水力坡度，$J=\sin\theta$，θ 为坡度；V——水流流速(m/s)。进一步通过加权平均计算，则可取得一场降雨径流过程中细沟水流的平均 Darcy—Weisbach 阻力系数。

2 结果与分析

2.1 阻力系数随径流过程的变化

2.1.1 不同降雨强度下阻力系数随径流过程的变化

图 2 为不同降雨强度下坡面细沟水流阻力系数随径流过程的变化情况。统计分析结果表明，不同雨强下，坡面细沟水流阻力系数随径流过程的变化可用指数方程描述，相关关系的显著性水平较高。

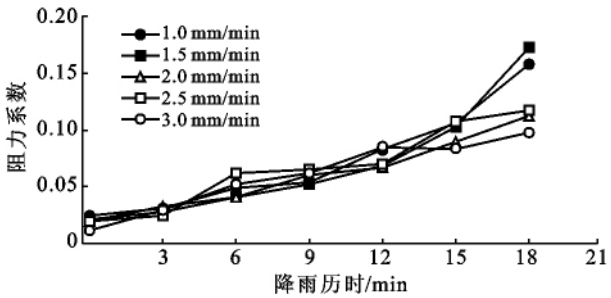


图 2 不同雨强下阻力系数随径流过程的变化

由图 2 得知，不同雨强下，坡面细沟水流阻力系数随径流历时的增加不断增加，各雨强下阻力系数增大趋势总体一致，其中，两个最大雨强下的阻力系数在产流 15 min 后增大速率明显加快，3 个小雨强下基本维持之前较为稳定的增加速率，各雨强下的细沟水流阻力系数差异较小。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开始产生时，由于细沟小区表面平整，径流沿程所受来自细沟床面的摩擦阻力及其产生的水流的紊动作用小，所以细沟水流阻力系数就小，随着径流过程的进行，细沟侵蚀不断发展，细沟床面愈不平整，前期侵蚀后形成的侵蚀微地形越来越复杂，使得细沟水流受到来自下垫面及其产生的水流质点紊动的阻滞作用越来越大，导致细沟水流流速不断减小，加之随径流过程的进行水深不断增大，水流含沙量也在增加，因此，综合作用的结果必然造成坡面细沟水流阻力系数随径流历时的增长而不断增大。

2.1.2 不同坡度下阻力系数随径流过程的变化

图 3 为不同坡度下坡面细沟水流阻力系数随径流过程的变化情况。统计分析结果表明，不同坡度下，坡面细沟水流阻力系数随径流过程的变化可用指数方程很好地描述，且各坡度下相关性都十分显著。

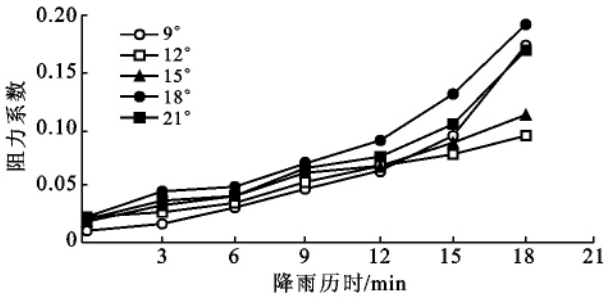


图 3 不同坡度下细沟水流阻力系数随径流过程变化

从图 3 可以看出，不同坡度下，坡面细沟水流阻力系数随径流历时的增长而不断增大，各坡度下细沟水流阻力系数变化过程总体一致，在产流开始的 15 min 以后增加速率出现差异，在 2 个最大坡度及 1 个最小坡度下阻力系数在产流 15 min 后增大速率明显加快，在其余 2 个中间雨强下基本维持了之前较为稳定的增加速率。各坡度下细沟水流阻力系数总的差异较小，较明显的差异在产流 15 min 后出现。不同坡度下，坡面细沟水流阻力系数随径流过程的变化与不同雨强下坡面细沟水流径流阻力系数随径流过程的变化具有极大的相似性。二者主要差异在于，不同雨强下的细沟水流阻力系数差异较不同坡度下的细沟水流阻力系数差异更小。

2.2 降雨强度对阻力系数的影响

次降雨径流过程的细沟水流平均阻力系数随降雨强度在相同坡度下，细沟水流平均阻力系数随雨强的增大而减小。对同坡度不同雨强下细沟水流平均阻力系数随雨强的变化进行统计分析表明，雨强对坡面细沟水流平均阻力系数的影响可用对数方程描述，相关方程及检验结果为：

$$f=-0.011\ln I+0.071\ 8\quad (R^2=0.67,\ p=0.1)\quad (2)$$

式中：f——细沟水流平均阻力系数；I——雨强(mm/min)。

相同坡度条件下，虽然由于雨强增大后，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、含沙量和侵蚀造成的微地形复杂性都增大，加之雨强增大后雨滴对水流打击扰动作用的增强，都可能使水流的水深增加，有增大阻力系数的作用，但随雨强增大，细沟水流的流速也显著增大，对水流阻力系数产生显著的减小作用，共同影响过程中，雨强对流速的增大作用在细沟水流阻力系数变化中有更强的控制作用，最终导致了同坡度下，坡面细沟水流平均阻力系数随雨强的增大而减小的变化特征。

2.3 坡度对阻力系数的影响

由来源于明渠水力学中的 Darcy—Weisbach 水

流阻力系数公式(1)可以看出,Darcy—Weisbach 阻力系数与坡度之间存在着公式中表述的确定性关系。然而,在径流过程中,由于随着坡度的改变水流的水力半径与流速都相应发生变化,无法评判在其他因素相同的条件下,坡度对水流阻力系数变化的影响。而通常研究某一单自变量对因变量的影响,必须要固定其他变量。因此,研究水流阻力系数随坡度单因子的变化,也就只能分析研究相同降雨等条件下,已经包含了坡度作用的综合水力学参数——Darcy—Weisbach 阻力系数与坡度之间的关系。

相同降雨强度不同坡度下次降雨径流过程中,坡面细沟水流平均阻力系数随坡度的增大而增大,但增大幅度很小。经对细沟水流平均阻力系数与坡度之间的关系进行统计分析表明,同降雨强度下,坡面细沟水流平均阻力系数随坡度的变化基本可用指数方程描述,经验方程及决定系数为:

$$f=0.044\ 5e^{0.026\ 4S}\quad (R^2=0.48,\ p=0.19) \tag{3}$$

式中:S——坡度(°)。

相同降雨强度下,由于随坡度增大,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,其水深减小,流速增大,但它们对水流阻力系数的减小作用并未能抵消坡度对水流阻力系数的增大作用,在共同对阻力系数作用的功效中,坡度的作用稍微起了更大的影响,所以,相同降雨强度下,坡面细沟水流平均阻力系数随坡度的增大稍微增加。

2.4　降雨强度及坡度对阻力系数的影响

对不同雨强及坡度条件次降雨径流过程中,坡面细沟水流平均阻力系数的变化进行统计分析得出,细沟水流平均阻力系数随雨强及坡度的变化基本可用二元指数方程描述,相关方程及检验结果为:

$$f=0.05e^{-0.08I+0.026S}\quad [R^2=0.53,\ F(2,6)=3.34<F(2,6)_{0.1}=3.46] \tag{4}$$

式中:I——雨强(mm/min);S——坡度(°)。

由公式(4)可以看出,细沟水流平均阻力系数与雨强之间呈负相关关系,与坡度之间呈正相关关系,雨强对细沟水流平均阻力系数的影响大于坡度的影响。

3　结 论

(1) 不同雨强条件下,细沟水流阻力系数随径流历时的增加不断增加,各雨强下增大趋势总体一致,可用指数方程很好地描述,其中,两个最大雨强下产流 15 min 后增大速率明显加快,3 个小雨强下基本维持之前较为稳定的增加速率,各雨强下阻力系数差异较小。

(2) 不同坡度条件下,细沟水流阻力系数随径流历时的增长而不断增大,各坡度下变化过程总体一致,可用指数方程很好地描述,产流开始 15 min 后增加速率出现差异,各坡度下阻力系数总的差异较小。

(3) 不同坡度条件下,细沟水流阻力系数随径流过程的变化与不同雨强下具有极大的相似性。其主要差异在于,不同坡度下的阻力系数差异较不同雨强下的更小。

(4) 相同坡度条件下,细沟水流平均阻力系数随雨强的增大而减小,可用对数方程描述。相同雨强下,细沟水流平均阻力系数随坡度的增大而增大,但增大幅度很小,基本可用指数方程描述。细沟水流平均阻力系数随雨强及坡度的变化基本可用二元指数方程描述。

[参 考 文 献]

[1] 丁文峰,李占斌,丁登山. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 3(16):72-75.

[2] 李占斌,秦百顺,亢伟,等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6):64-68.

[3] 张光辉,卫海燕,刘宝元. 坡面流水动力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3):58-61.

[4] Abrahams A D, Li Gang, Parson A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(1):35-47.

[5] Abrahams A D, Li Gang, Parson A J. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces [J]. Catena, 1994, 23(1/2):111-140.

[6] Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills [J]. Transactions of ASAE, 1990, 33(6): 1900-1906.

[7] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: Velocity relationships [J]. Transactions of ASAE, 1984, 27(3):790-796.

[8] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究,1991(4):39-46.

[9] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特性的研究[J]. 泥沙研究,1999(1):56-61.

[10] 姚文艺. 坡面流阻力规律试验研究[J]. 泥沙研究, 1996(1):74-82.

[11] Hu Shixiong, Abrahams A D. Resistance to overland flow due to bed-load transport on plane mobile beds [J]. Earth Surface Processes and Landform, 2004, 29(13):1691-1701.

(下转第 42 页)

$$f=9.82q^{0.925}s^{-0.477} \quad (R^2=0.85,\ d=2.5\sim5\ \text{mm}) \tag{16}$$

$$f=19.68q^{0.882}s^{-0256} \quad (R^2=0.85,\ d=5\sim10\ \text{mm}) \tag{17}$$

式中：f——Darcy—Weisbach 阻力系数。经验证表明，阻力系数主要受流量控制，坡度对其影响很小，与张光辉的研究结论相似[15]。

3 结 论

（1）薄层水流流态与流量、坡度、糙率等有关，但也可以看出，流量和糙率对流态影响比较显著。相同坡度，相同流量条件下，随着糙率的增大，流态向层流延伸；流型趋向于缓流。相同坡度，相同糙率条件下，随着流量的增大，流态向过渡流和紊流发展，流型趋向急流。

（2）在糙率、坡度相同情况下，坡面流的平均流速，水深和阻力系数都随流量的增大而增大；在坡度、流量相同条件下，随着糙率的增大，坡面流的平均流速在减小，阻力系数和水深在增大；平均流速，平均水深，阻力系数与流量和坡度的关系可用幂函数表示，而且主要由流量控制。

[参 考 文 献]

[1] 敬向峰，吕宏兴，张宽地，等. 不同糙率坡面水力学特征试验研究[J]. 水土保持通报，2007，27(2)：33-38.

[2] 张洪江，北原曜，远藤泰造. 几种林木枯落物对糙率系数 n 值的影响[J]. 水土保持学报，1994，1(12)：4-10.

[3] Foster G R. User Requirements：USDA-water Erosion Prediction Project(WEPP)[R]. National Soil Erosion Research Laboratory Report No. 1(USDA-ARS：W Lafayette，IN.)，1987.

[4] Abrahams A D，Parson A J. Hydraulic of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces[J]. Catena，1994，23(1/2)：111-140.

[5] Atkinson J F，Abrahams A D，Krishnan C，et al. Shear stress portioning and sediment transport by overland flow [J]. Journal of Hydraulic Research，2000，38(1)：37-40.

[6] 肖培青，姚文艺，申震洲，等. 草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究[J]. 水土保持学报，2009，23(4)：50-53.

[7] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展，2001，12(3)：395-402.

[8] 吴淑芳，吴普特，原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报，2010，26(3)：14-19.

[9] 吴持恭. 水力学 [M]. 2 版. 北京：高等教育出版社，1982.

[10] 吴普特，周佩华. 坡面薄层水流流速影响因子及计算[J]. 水土保持研究，1994，1(5)：26-30.

[11] Foster G R，Huggins L F，Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics I：Velocity relationship [J]. Transactions of ASAE，1984，27(3)：790-796.

[12] 江忠善，宋文经. 坡面流速的试验[J]. 西北水土保持研究所集刊，1988(7)：46-52.

[13] Govers G. Relationships between discharge，velocity and flow area for rills eroding loose，non-layered materials[J]. Earth Surface Processes Landforms，1992，17(5)：515-528.

[14] Nearing M，Norton L，Bulgakov D，et al. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research，1997，33(4)：865-876.

[15] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展，2002，13(2)：159-165.

（上接第 37 页）

[12] Hu Shixiong，Abrahams A D. The effect of bed mobility on resistance to overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landform，2005，30(11)：1461-1470.

[13] Hu Shixiong，Abrahams A D. Partitioning the flow resistance to overland flow on rough mobile beds[J]. Earth Surface Processes and Landform，2006，31(10)：1280-1291.

[14] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展，2002，13(2)：159-165.

[15] Li Gang. Preliminary study of the interference of surface objects sand rainfall in overland flow resistance [J]. Catena，2009，78(2)：154-158.

[16] 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(2)：236-240.