

不同人工糙率床面水力学特性的试验研究

翟艳宾¹, 吴发启¹, 王健¹, 尹武君^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

摘要: 采用变坡试验水槽, 研究了不同流量, 不同坡度以及不同糙率条件下坡面流水力学参数(雷诺数、弗劳德数、平均流速、水深和阻力系数)变化规律。研究结果表明, 在糙率、坡度相同情况下, 坡面流的雷诺数、弗劳德数、平均流速、水深和阻力系数均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, 坡面流的雷诺数、弗劳德数和平均流速在减小, 阻力系数和水深在增大; 平均流速、水深和阻力系数与流量和坡度的关系可用简单幂函数表示, 而且主要由流量控制。

关键词: 坡面流; 糙率; 流态; 流速; 水深; 阻力系数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0038-05

中图分类号: S157.1

Hydraulic Characteristics of Artificial Surfaces with Different Roughness

ZHAI Yan-bin¹, WU Fa-qi¹, WANG Jian¹, YIN Wu-jun^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Sichuan Electric Power Design Consulting Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610016, China)

Abstract: The variations of hydro-dynamic parameters (Reynolds number, Froude number, average flow velocity, water depth and resistance coefficient) of overland flows were characterized under different flow discharge, slope gradient and roughness based on flume experiments. The research results indicated that Reynolds number, Froude number, average flow velocity, water depth and resistance coefficient of the overland flows increased with flow discharge for the artificial beds with same roughness and slope gradient. Under the conditions of same gradient and flow discharge, Reynolds number, Froude number and average flow velocity of the overland flows decreased with increasing roughness, while resistance coefficient and flow depth increased. Flow discharge and slope gradient were found closely correlated with the hydraulic parameters such as average flow velocity, water depth, and resistance coefficient, which could be well described by simple power functions. Furthermore, the influences of flow discharge were dominant.

Keywords: overland flow; roughness; flow regime; flow velocity; water depth; resistance coefficient

坡面流是指在重力作用下顺坡面流动的浅层水流, 遍布于整个坡面, 当流量过大时, 往往形成细沟流, 总体接近于浅水明渠流动, 因此可按均匀流进行分析。由于坡面流水深很小, 与地表的微起伏属同量级, 地面微小突起都可能超出坡面流表面, 所以受不规则地形的影响较大, 量测难度大, 不易在野外进行试验。而反映下垫面状况的指标是坡面地表粗糙度或地表糙率(糙率系数), 坡面地表粗糙度或地表糙率直接影响着坡面的水力学特性^[1]。对于水力学特性的试验研究一般采用糙率描述壁面的粗糙程度, 糙率是衡量壁面粗糙情况的一个综合性系数, 它的取值大小直接影响水力学要素的大小。糙率是反映坡面状

况阻延地表径流的指标, 尤其是土壤表面覆盖的枯枝落叶和生长的草本植物对地表径流具有阻延、拦蓄、过滤作用, 从而改变坡面的水文过程^[2]。因此研究坡面糙率对坡面水文过程和土壤侵蚀过程模拟具有重要意义, 目前对坡面水动力学特性的研究^[3-6], 主要集中在裸土坡面和草被覆盖坡面, 而涉及不同人工糙率坡面水力学特性的研究很少。本研究采用定床变坡度的方法, 进行不同糙率床面试验, 使得试验过程中水槽底部的糙率保持不变, 这样既可以模拟天然地表糙率, 又消除了下垫面糙率变化对水流阻力等要素的影响^[7], 分析了不同糙率对坡面流水力学要素的影响, 为坡面流水力学特性研究提供试验依据。

收稿日期: 2011-10-31

修回日期: 2012-03-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡耕地地表糙度对产汇流的影响研究”(41271288)

作者简介: 翟艳宾(1987—), 男(汉族), 内蒙古自治区卓资县人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 373002853@qq.com。

通信作者: 吴发启(1957—), 男(汉族), 陕西省黄陵县人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与流域管理研究。E-mail: wufaqi@263.net。

1 试验设计与方法

1.1 试验设计

本试验由于易受下垫面糙率变化的影响,人工糙率模拟复杂,在野外试验小区进行放水试验及坡面处理不够现实,故自制放水装置,在室内进行放水冲刷试验。放水装置包括供水管,支架,蓄水池,稳流槽和矩形试验水槽(6 m×1 m×0.3 m),矩形水槽用 8 mm 厚的有机玻璃制作而成,坡度可调,坡度变化范围为 0°~15°。为了试验操作方便,在纵坡面将 1 m 宽平分为 2 等份,用有机玻璃分隔,制成两个(6 m×0.5 m×0.3 m)水槽。

试验在有机玻璃床面($d=0$ mm)和人工糙率床面两种床面状况下进行,选取坡度为 3°,5°,8°,10°和 12°共 5 种坡度。人工糙率床面是先在床面内壁均匀的涂一层相当厚度的玻璃胶,用均匀粒径的砂粒粘在床面上,形成一定粗糙度的壁面,床面粘贴的砂粒为用震动筛对自然级配的砂粒进行筛分而来,其砂粒粒径分别为 $d=2.5\sim 5$ mm 和 $d=5\sim 10$ mm,以形成具有凸起的相对均匀砂粒糙度。放水流量根据黄土高原经常侵蚀性降雨雨强的范围及径流情况,结合冲刷槽的尺寸和实际情况,设计放水流量分别是 0.20,0.25,0.30,0.35,0.45 L/s。共计 $5\times 3\times 5=75$ 个处理。

试验在(6 m×0.5 m×0.3 m)水槽内进行,按水流方向设 5 个观测断面,断面间距为 1 m,距水槽进口 1 m 处为第 1 观测断面,依次为 2,3,4,5 观测断面,每个观测断面按横向左、中、右 3 个测点来测取流速,去掉 1 个最大值和 1 个最小值,然后取平均值,流量用体积法(≤ 0.25 L/s)和 60°三角形薄壁堰(>0.25 L/s)配合量测。

1.2 试验方法

试验准备就绪,开启蓄水池上水龙头开关,向稳流槽中注水,并采用体积法和 60°三角形薄壁堰进行流量量测。

待床面水流达到稳定流后,再使用染色剂法(KMnO_4),在不同断面多次测定表层流速,求其平均值,并乘以修正系数 0.75^[8]作为水流断面平均流速,每 1 个处理利用水银温度计(精度为 0.1)在开始和结束之前各测 1 次水温。

1.3 数据分析方法

由于坡面水流水层极薄,采用实测法测定水深难以准确测定,因此假定水流沿坡面(分坡上、坡中、坡下)是均匀分布的,采用的计算公式为:

$$h=q/U=Q/(UBt) \quad (1)$$

式中: h ——坡面水深(m); q ——单宽流量 $[\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})]$;

Q —— t 时间内径流量(m^3); t ——径流取样间隔时间(s); U ——断面平均流速(m/s); B ——过水断面宽度(m)。

判断坡面流流态的指标一般采用雷诺数和弗劳德数。雷诺数和弗劳德数均为无量纲数,雷诺数 R_e 是水流的惯性力与黏滞力的比值,是水流型态的重要判据, R_e 越大,说明水流惯性力越大,水流发生紊流的可能性也就越大,根据明渠均匀流的基本理论,层流和紊流的界限雷诺数对于矩形断面的明渠水流大致在 500 左右,雷诺数大于 500,属于过渡流或紊流;小于 500 则属于层流,雷诺数计算式如下

$$R_e=UR/v \quad (2)$$

式中: U ——水流平均流速(m/s); R ——水力半径(m); v ——运动黏滞系数(m^2/s),运动黏滞系数 v 值根据所测水温通过经验公式^[9]计算得到,运动黏滞系数 v 公式为:

$$v=0.01775/(1+0.0337t+0.00022t^2) \quad (3)$$

式中: v ——运动黏滞系数(m^2/s); t ——水温度($^{\circ}\text{C}$)。

弗劳德数 F_r 是水流的惯性力和重力之比值。弗劳德数 F_r 是否大于 1,可以作为判别明渠水流是急流还是缓流的标准,计算公式为:

$$F_r=\frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

式中: g ——重力加速度(m/s^2)。

$F_r=1$ 时,说明惯性力作用与重力作用相等,水流为临界流; $F_r>1$ 时,说明惯性力作用大于重力作用,惯性力对水流起主导作用,这时水流为急流; $F_r<1$ 时,惯性力作用小于重力作用,这时重力对水流起主要作用,水流为缓流。

坡面薄层水流在流动过程中必然受到阻力的作用,因此,阻力是坡面薄层水流水动力学规律另一个极其重要的因素。长期以来,人们一直采用传统明渠水流阻力的概念和表达方法,由于 Darcy—Weisbach 阻力系数公式表达具有良好的物理意义,且符合量纲一致的原则,因此,坡面流阻力系数采用 Darcy—Weisbach 阻力系数,计算公式为:

$$f=8gRJ/U^2 \quad (5)$$

式中: J ——水力坡度,对于均匀流, $J=i=\sin\theta$, θ ——水槽坡度。

2 结果与分析

2.1 坡面流流态

水流流态是表征坡面径流水动力学特性的基本参数,它与坡面径流计算和输沙演算直接相关^[10]。因此研究坡面水流流态具有重要的科学意义。但是

由于坡面薄层水流易受下垫面和边界条件影响,很难准确判断流态,有关坡面流流态判断仍处于研究中,尚无定论。通常根据水力学原理,采用雷诺数和弗劳德数进行判别。计算结果详见表 1。

表 1 不同床面,不同流量,不同坡度坡面流的雷诺数

床面状况 <i>d</i> /mm	坡度/ (°)	流量/(L·s ⁻¹)				
		0.2	0.25	0.3	0.35	0.45
0	3	479	611	645	692	740
	5	480	549	667	729	757
	8	550	582	656	737	788
	10	602	631	687	721	799
	12	591	629	695	751	783
2.5~5	3	187	251	325	465	594
	5	192	251	323	464	589
	8	188	253	362	451	607
	10	196	245	326	469	597
	12	205	268	327	464	601
5~10	3	166	255	318	436	584
	5	170	210	329	434	584
	8	163	291	325	452	568
	10	164	230	316	460	606
	12	180	221	318	465	598

由表 1 可知,相同糙率,相同坡度情况下,随着流量的增大,坡面流雷诺数逐渐在增大,雷诺数正比于流量;相同糙率,等流量情况下,随着坡度增加,绝大部分坡面流雷诺数在不断增加,由此说明,随着坡度变陡,坡面流逐渐向紊流过渡;相同坡度,等流量情况下,随着坡面糙率的增加,坡面流雷诺数在减小,这是由于坡面流阻力的增加,流速在减小,使坡面流向层流延伸。同时,可以看出,流量与糙率对坡面流流态影响比较大,而坡度对流态影响不显著。

由表 2 可知,坡度大于 3°,单宽流量大于 0.2 (L/(s·m)) 和糙率 $d \leq 2.5 \sim 5$ mm 条件下,坡面流一直处于急流状态,等流量,同坡度情况下,随着糙率的增加,坡面流弗劳德数在减小,说明随阻力增加,使坡面流向缓流发展;等流量,相同糙率情况下,随着坡度的增大,坡面流弗劳德数与坡度成正相关。同坡度,同糙率情况下,坡面流弗劳德数与流量成正比,反映出流量增加也可使水流流型发生改变。

2.2 流速

水流流速是决定水流流动形态以及进一步深入研究其侵蚀机制的重要参数。众所周知,薄层水流及薄层水流侵蚀是坡面径流及侵蚀的开端,是研究坡面径流、坡面侵蚀乃至整个小流域侵蚀产沙的基础^[11]。前人研究表明,坡面流流速应为流量和坡度的幂函数。无论是层流的谢才公式还是紊流的曼宁公式,都

可表示为 $V = cq^a S^b$ 。本研究分别对不同糙率床面的 75 组数据分析后发现,坡面薄层水流流速与流量和坡度呈幂函数关系。

$$V = 33.82q^{0.590} s^{-0.050} \quad (6)$$

$$(R^2 = 0.88, d = 0 \text{ mm})$$

$$V = 29.64q^{0.633} s^{0.161} \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.90, d = 2.5 \sim 5 \text{ mm})$$

$$V = 32.71q^{0.582} s^{0.150} \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.89, d = 5 \sim 10 \text{ mm})$$

式中: V ——坡面流平均速度(m/s); q ——单宽流量 (L/(s·m)); S ——坡度(m/m); R^2 ——决定系数,公式(6)~(8)与江忠善流速方程的形式基本相同,但流量和坡度的指数都有差别^[12]。公式(6)~(7)去掉坡度项,平均流速与流量也呈良好线性关系

$$V = 38.40q^{0.593} \quad (9)$$

$$(R^2 = 0.86, d = 0 \text{ mm})$$

$$V = 21.03q^{0.633} \quad (10)$$

$$(R^2 = 0.74, d = 2.5 \sim 5 \text{ mm})$$

$$V = 17.28q^{0.582} \quad (11)$$

$$(R^2 = 0.72, d = 5 \sim 10 \text{ mm})$$

与公式(6)相比,公式(9)的决定系数大约下降了 2%;与公式(7)相比,公式(10)的决定系数下降了 16%;与公式(8)相比,公式(11)的决定系数下降了 17%。表明薄层水流的平均流速主要受流量控制,可用简单的流量幂函数关系表示。该结果与 Govers^[13]和 Nearing^[14]在侵蚀动床上得到的实验结果一致。

表 2 不同床面、不同流量、不同坡度坡面流的弗劳德数

糙率 <i>d</i> / mm	坡度/ (°)	流量/(L·s ⁻¹)				
		0.2	0.25	0.3	0.35	0.45
0	3	3.9	3.8	3.4	2.9	3.9
	5	5.4	5.2	5.3	4.3	4.6
	8	7.7	6.7	7.2	5.5	5.7
	10	9.1	8.3	7.8	6.9	6.0
	12	11.2	8.8	8.9	6.9	7.0
2.5~5	3	0.8	0.7	0.9	1.0	1.1
	5	0.9	0.8	1.1	1.0	1.2
	8	0.9	0.9	1.2	1.1	1.3
	10	1.0	1.0	1.3	1.2	1.5
	12	1.0	1.1	1.4	1.3	1.4
5~10	3	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6
	5	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9
	8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9
	10	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	12	1.0	0.9	1.1	1.1	1.2

2.3 平均水深

水深也是坡面最基本的水动力学特性之一,由图 1—3 可以看出,相同糙率床面,同坡度条件下,随着流量的增大,水深呈幂函数增加;相同糙率床面,等流量条件下,随着坡度的增大,平均水深却在减小。这可能是因为随着坡度的增大,能量主要转化为动能,水流速度增大,所以引起水深减小。相同坡度,等流量条件下,随着糙率增大,水深在增大。这可能是由于水流流动过程中,水深较浅,床面凸起部分阻碍了水流的流动方向,可能会选择发育流道,绕道而行的方式。流道的出现增加了流程,必将有更多的沿层损失,导致流速减小,流量增大。本研究分别对不同糙率床面的 75 组数据分析后发现,水深与流量和坡度间成幂函数关系:

$$H=0.426q^{0.722}s^{-0.219} \quad (R^2=0.93, d=0 \text{ mm}) \quad (12)$$

$$H=0.875q^{0.391}s^{-0.134} \quad (R^2=0.86, d=2.5\sim 5 \text{ mm}) \quad (13)$$

$$H=0.699q^{0.794}s^{-0.148} \quad (R^2=0.93, d=5\sim 10 \text{ mm}) \quad (14)$$

式中: H ——平均水深(m)。分析表明,与平均流速相类似,水深也主要受流量的控制,坡度影响很小。

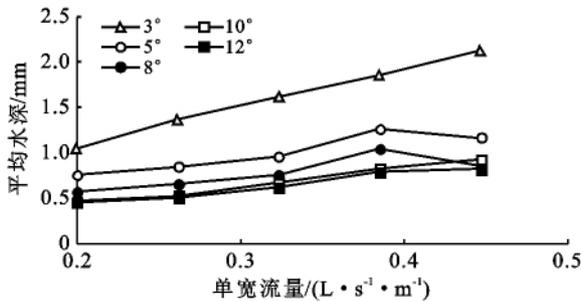


图 1 光滑床面($d=0 \text{ mm}$)水深与单宽流量关系曲线

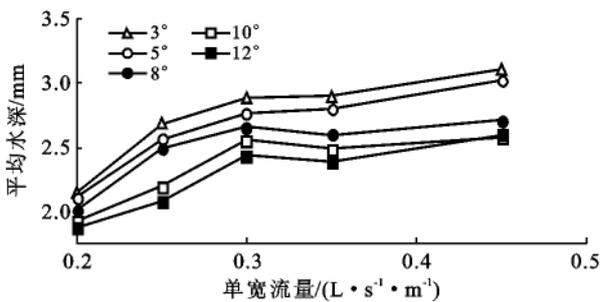


图 2 $d=2.5\sim 5 \text{ mm}$ 床面水深与单宽流量关系曲线

2.4 阻力系数

Darcy—Weisbach 阻力系数反映了坡面流在流动过程中所受到的阻力大小,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,则水流用于侵蚀和泥沙输移的能量越小,土壤侵蚀就越微弱,反之则土壤侵蚀剧烈。因而探讨坡面流阻力系数对于研究侵蚀过程力学机理具有重要的理论意义。根据公式(5)计算出各流量的阻力系数详见表 3。

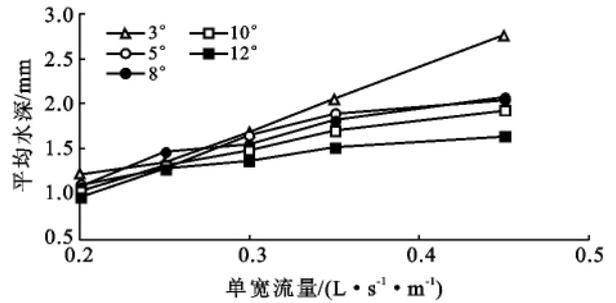


图 3 $d=5\sim 10 \text{ mm}$ 床面水深与单宽流量关系曲线

表 3 不同糙率,不同流量,不同坡度坡面流的阻力系数

糙率 $d/$ mm	坡度/ (°)	流量/($L \cdot s^{-1}$)				
		0.20	0.25	0.30	0.35	0.45
0	3	0.027	0.028	0.036	0.049	0.058
	5	0.024	0.026	0.030	0.038	0.043
	8	0.019	0.025	0.026	0.037	0.041
	10	0.017	0.023	0.023	0.030	0.040
	12	0.014	0.022	0.023	0.025	0.035
2.5~5	3	1.04	1.65	2.29	2.55	2.92
	5	1.46	1.87	2.60	2.34	2.48
	8	0.99	1.00	1.37	1.46	1.54
	10	0.82	1.23	1.55	1.77	1.88
	12	0.61	0.93	1.11	1.18	1.47
5~10	3	1.51	1.86	2.72	2.97	2.92
	5	1.16	1.63	3.23	3.31	3.56
	8	1.27	1.99	2.61	2.90	2.73
	10	1.56	2.03	2.86	2.94	2.54
	12	2.42	1.65	2.68	2.89	2.13

由表 3 可知,相同坡度,等流量条件下,随着糙率的增大,阻力系数在增大;相同坡度,相同糙率条件下,随着流量的增大,阻力系数在增大。由公式(5)可以看出,流速与阻力系数的平方成反比,而流速的变化主要是由流量控制,所以流量的变化必定影响阻力系数。相同糙率,等流量条件下,随着坡度的增大,阻力系数在增加。说明水流提供的能量越多,消耗也越多。对 75 组数据进行拟合表明,坡面流阻力系数与流量和坡度呈幂函数关系:

$$f=14.91q^{0.969}s^{-0.343} \quad (R^2=0.94, d=0 \text{ mm}) \quad (15)$$

$$f=9.82q^{0.925}s^{-0.477}$$

$$(R^2=0.85, d=2.5\sim 5\text{ mm}) \quad (16)$$

$$f=19.68q^{0.882}s^{-0.256}$$

$$(R^2=0.85, d=5\sim 10\text{ mm}) \quad (17)$$

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 partitioning 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.