

# 不同糙率坡面水力学特征的试验研究

敬向锋<sup>1,2</sup>, 吕宏兴<sup>1,2</sup>, 张宽地<sup>1</sup>, 雒天峰<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 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; 3. 甘肃省水利科学研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 在室内试验的基础上, 采用定床阻力试验研究了坡面流水力学参数(雷诺数、佛汝德数、阻力系数和流速)随床面糙率、流量和坡度的变化规律。初步得出以下结论: (1) 在床面和流量相同条件下, 坡面流雷诺数和佛汝德数均随坡度的增加而增大。(2) 在坡度和流量相同情况下, 随着坡面粗糙度增加, 坡面流雷诺数和佛汝德数均呈减小趋势; 同时水流流速减小, 阻力系数增大, 这说明水流克服阻力做功所消耗的能量也增加。

**关键词:** 坡面流; 雷诺数; 佛汝德数; 阻力系数; 流速

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)02-0033-06

中图分类号: S157.1

## Experimental Study of Overland Flow Hydromechanics Under Different Degrees of Roughness

JING Xiang-feng<sup>1,2</sup>, LU Hong-xing<sup>1,2</sup>, ZHANG Kuan-di, LUO Tian-feng<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Water Resources of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** The relationships for hydrodynamic parameters (Reynolds number, Froude number, resistance coefficient and flow velocity) of overland flow as a function of bed roughness, flow discharge and slope gradient were simulated by means of indoor fixed-bed resistance experiments. The preliminary result indicates that Reynolds number and Froude number of overland flow tend to increase as slope gradient increases in the condition of same bed surface and flow discharge. Reynolds Number and Froude number of overland flow tend to diminish, water flow velocity tends to diminish, and resistance coefficient tends to increase as bed surface roughness increases in the condition of same slope gradient and flow discharge. It shows that consumed energy for working of water flow against resistance tends to increase.

**Keywords:** overland flow; Reynolds number; Froude number; resistance coefficient; flow velocity

坡面流流经的地表边界的表面总是粗糙不平的, 当水流流经地表时, 随着地表粗糙程度的不同对坡面流的影响程度也不同, 地表的粗糙度对坡面水力学特征产生显著影响。由于坡面流水深较浅, 受下垫面状况(坡面边界层)的影响显著, 量测难度大, 使得坡面流研究遇到许多困难。反映下垫面状况的指标是坡面地表粗糙度与糙率(粗糙系数), 坡面地表粗糙度与糙率的大小直接影响着坡面水力学特性。糙率是水力学反映水流阻力的一种综合系数。坡面流水深浅且易受坡面边界层干扰, 所以坡面流的阻力不同

于管流与明流中的糙率, 一般称其为“有效糙率”<sup>[1-2]</sup>。目前对坡面水力学特征的研究主要集中在裸土坡面<sup>[3]</sup>, 而涉及不同粗糙坡面水力特性的基础研究较少。传统理论认为粗糙壁面的作用在于增加床面阻力, 对近壁流区造成影响<sup>[4]</sup>, 而坡面流属近壁流区范围内。

本文通过定床人工加糙阻力试验, 分析了不同粗糙坡面对坡面水力学特性的影响, 为侵蚀性坡面流研究提供了试验依据, 为进一步研究坡面水力学特性奠定了基础。

收稿日期: 2006-12-18

修稿日期: 2007-01-11

资助项目: 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开放基金(10501-141)

作者简介: 敬向锋(1982-), 男(汉族), 甘肃环县人, 在读硕士, 主要从事水力学与土壤侵蚀方面的研究。E-mail: jxfguojiafagaiwei@163.com。

通讯作者: 吕宏兴(1955-), 男(汉族), 陕西陇县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水力学与流体力学、节水灌溉技术方面的研究。E-mail: lvhongxing@sohu.com。

# 1 试验设计要点及方法

## 1.1 试验设计要点

自然界中的坡面流,多是动床非恒定沿程变量流,对其直接进行全面观测难度很大,因此为了对坡面流进行定量描述,也为了便于模拟坡面边界状况,专门为坡面流设计了定床阻力试验方案。鉴于坡面流水层较薄,采取的方法是将其近似看成二维水流,沿程设 3 个观测断面,观测其断面的水深与流速。

(1) 试验在长 4.6 m, 宽 0.2 m, 深 0.08 m, 边坡系数为 1 的梯形试验水槽内进行。梯形水槽用 3 mm 厚的有机玻璃制作而成,坡度可调,坡度变化范围为  $0^\circ \sim 15^\circ$ 。

(2) 试验在有机玻璃床面( $d=0$ )和人工粗糙床面两种床面状况下进行,选取坡度  $\theta=5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ , 3 种坡度。人工粗糙床面是先在床面内壁反复均匀的涂一层相当厚度的清漆,用均匀粒径的砂粒均匀地粘在床面上,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  $d=0.5\sim 1, 1\sim 2, 2\sim 5, 5\sim 10$  mm, 以形成具有凸起的相对均匀砂粒糙度。

(3) 根据实际情况,设计单宽流量分别为 0.13, 0.25, 0.38, 0.50, 1.00, 1.50, 2.5, 10, 15, 20 L/(s·m) 共 11 个试验处理,每种床面选 8 种设计流量,以便在槽中产生不同水流流速。

(4) 试验按水流方向设 3 个观测断面,断面间距为 1 m,距水槽进口 2 m 处为第 1 观测断面,依次为 2、3 观测断面,每个观测断面按横向分左、中、右 3 个测点来测取流速和水深。

(5) 供水系统由 10 m<sup>3</sup> 蓄水池、水泵、阀门组成,通过调节阀门控制流量,水槽内单宽流量可在 0~20 L/(s·m) 间变化。流量用体积法量水箱和 30° 三角形薄壁堰量测。

(6) 在每个施测流量用输液器模拟雷诺试验装置,对坡面流流态进行观测。

## 1.2 试验方法

试验准备好后,开启水泵电源开关,向试验水槽供水。待坡面水流达到稳定后,在水槽尾部用体积法(量水箱)和 30° 三角薄壁堰法量测流量。小流量( $< 1$  L/s)用体积法,体积法计算公式如(1)式表示;大流量( $> 1$  L/s)采用三角形薄壁堰法,其流量计算公式如(2)式表示<sup>[5]</sup>。

$$Q = (1 \times b \times h) / t \quad (1)$$

式中:  $Q$  —— 流量(m<sup>3</sup>/s);  $l$  —— 水箱长(m);  $b$  —— 水箱宽(m);  $h$  —— 水深(m);  $t$  —— 时间(s)。

$$Q = 0.37138(H + 0.0023)^{2.5} \quad (2)$$

式中:  $Q$  —— 流量(m<sup>3</sup>/s);  $H$  —— 堰上水头(m)。

每个流量用温度计测蓄水池内水温一次,并在距水槽进口 2 m 处模拟雷诺试验,观察记录水流流态变化情况,当输液器针头中流出的颜色水在水流中是一条细直而鲜明的直线型带色流束的时候说明水流流态处于层流状态;随着流量增大,当带色流束开始颤抖并弯曲时说明水流流态处于过渡流状态;流量继续增大,当带色流束失去清晰形状、完全扩散的时候,说明水流流态处于紊流状态。流速用染色剂法(KM-nO<sub>4</sub>)量测,观测位置分别选择在距水槽进口 1 m 以下和距水槽末段 0.6 m 以上 3 m 范围。水深采用 SX40-1 型水位测针测定,精度为 0.01 mm。粗糙床面水深测量采用由上到下的方法。即先用一定厚度的玻璃板(玻璃板厚度事先用精度为 0.01 mm 游标卡尺进行测量)放于粗糙床面上,用测针确定零点,去掉玻璃板,待水面平稳后,再读水面读数  $H_{测}$ , 水面读数加上玻璃板厚度  $H_0$  即为人工粗糙床面最高平面到水面的水深;鉴于绝对粗糙度对水深测量的影响,因人工粗糙床面所粘沙粒缝隙间也有水深,该部分水深采用床面所粘贴沙粒最大粒径  $D_{max}$  减去床面实际粗糙层厚度  $\delta$  得到;实际有效水深  $h$  即为以上两部分水深相加而得到,如(3)式表示。

$$h = -H_{测} \pm H_0 + (D_{max} - \delta) \quad (3)$$

式中:  $h$  —— 实际有效水深(mm);  $H_{测}$  —— 测针读数(负数,mm);  $H_0$  —— 玻璃板厚度(mm),水深大于玻璃板厚度时用“+”号,水深小于玻璃板厚度时用“-”号;  $D_{max}$  为沙粒最大粒径(mm);  $\delta$  —— 床面实际粗糙层厚度(mm),本试验取  $\delta = (D_{max} + D_{min}) / 2$ 。

本试验光面情况下进行了  $3 \times 8 = 24$  组试验,床面粘砂情况下进行了  $3 \times 4 \times 8 = 96$  组试验,共计 120 组试验。由于坡面流水深较浅,流速难以观测,而水深和流量测量较准,所以水流平均流速  $V$  采用流量与水深关系式(4)计算得到,染色法流速仅仅作作为参考值。

$$V = q / h \quad (4)$$

式中:  $q$  —— 单宽流量[L/(s·m)];  $h$  —— 平均水深(m)。

## 2 研究方法

表征坡面流的水力学特征的参数一般包括雷诺数、佛汝德数、阻力系数与流速等。由于本试验为室内定床阻力试验,水流为清水,所以不必考虑含沙量对水流粘滞系数的影响;坡面流水深较浅,水面波动也很小,可以忽略不计,波速  $C$  值不必计入波高的影

响。因此采用水力学常用公式分析坡面水力学特征即可。

判断坡面流流态的指标一般用雷诺数和佛汝德数。雷诺数和佛汝德数均为无量纲数, 雷诺数是水流的惯性力与粘滞力的比值; 而佛汝德数是代表水流的惯性力与重力 2 种作用力的对比关系。计算雷诺数采用(5)式:

$$Re = RV/\nu \quad (5)$$

式中:  $V$ ——水流平均流速(m/s);  $R$ ——水力半径(m);  $\nu$ ——运动粘滞系数( $m^2/s$ ), 运动粘滞系数  $\nu$  值根据所测水温查《水力学》表而得到<sup>[6]</sup>。

本试验模型为梯形水槽, 水力半径采用梯形断面水力半径公式计算, 如式(6)所示:

$$R = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \quad (6)$$

式中:  $b$ ——梯形水槽底宽(m);  $m$ ——梯形水槽边坡系数。

本研究采用明渠方法对坡面流流态进行分析。根据对明渠水流的已有研究<sup>[6-7]</sup>, 明渠水流中的下临界雷诺数  $Re'$  并非一固定值, 而是一个随实际情况有所变化的变化值, 已有研究中, 一般取下临界雷诺数  $Re'$  的值为 500 或 575(等于管流临界雷诺数 2 320 的 1/4)。

本试验模拟雷诺试验对水流流态进行了观测, 由于试验条件有限, 虽未得出下临界雷诺数  $Re'$  的具体值, 但通过试验观测和分析计算, 发现针对本试验宜取  $Re' = 575$  较妥, 上临界雷诺数  $Re''$  的范围一般为 3 000~10 000, 本研究取  $Re'' = 6 500$ 。当雷诺数较小时, 粘滞力作用大, 惯性力作用小, 粘滞力对水分子运动起推动作用, 液流呈层流状态; 当雷诺数较大时, 惯性力作用大, 粘滞力作用小, 惯性力对水分子运动起推动作用, 液流呈过渡流或紊流状态。

计算佛汝德数用(7)式:

$$Fr = V/C \quad (7)$$

$$C = \sqrt{gh} \quad (8)$$

式中:  $C$ ——波速(m/s);  $g$ ——重力加速度( $g = 9.8 m/s^2$ )。

$Fr = 1$  时, 说明惯性力作用与重力作用相等, 水流为临界流;  $Fr > 1$  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;  $Fr < 1$  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。

由于 Darcy weisbach 阻力系数公式表达具有良

好物理意义, 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, 计算式如(9)表示:

$$\lambda = 8gRJ/V^2 \quad (9)$$

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

### 3 坡面水力特征分析

#### 3.1 流区

流区是指坡面内的紊动水能, 究竟处于层流区、过渡区还是紊流区, 根据已有研究, 可认为当雷诺数  $Re < 575$  处于层流区,  $575 < Re < 6 500$  处于过渡流区,  $Re > 6 500$  处于紊流区<sup>[8-15]</sup>。倘若进行严格划分的话,  $Re > 6 500$  的紊流区又可分为紊流光滑区、紊流过渡粗糙区和紊流粗糙区。紊流光滑区虽已属于紊流, 但此时黏性底层厚度还不足以掩盖粗糙床面突出高度, 粗糙度还没有发生作用; 紊流过渡粗糙区, 随着雷诺数增大, 黏性底层厚度逐渐减小, 床面突出高度突破黏性底层厚度而对流态发生作用时即进入紊流过渡粗糙区; 紊流粗糙区, 随着雷诺数继续增大, 床面粗糙度作用更加突出, 黏性底层大大减薄, 粘滞力作用可以忽略不计, 就进入紊流粗糙区, 或称阻力平方区。

鉴于本试验所涉及点据绝大多数处于过渡流区, 紊流区点据达不到详细区分要求, 所以对紊流区就不严格区分。本试验范围内的坡面流, 水深变化于 1.093~22.096 mm 之间, 平均流速变化于 0.092~2.624 m/s 之间, 各次测得的雷诺数如表 1 所示。

由表 1 可见, 一般情况下, 坡面流处于层流区、过渡流区和阻力平方区 3 个流区。等坡度, 相同床面状况下, 随着流量增加, 雷诺数相应增加, 雷诺数正比于单宽流量; 相同床面状况, 等流量情况下, 随着坡度的增加, 绝大部分坡面流雷诺数呈增加趋势, 这说明坡度越陡, 坡面流流态越倾向于向过渡流区和阻力平方区延伸; 等坡度, 同流量情况下, 随着床面粗糙度的增加, 坡面流雷诺数呈减小趋势, 这说明床面越粗糙, 坡面流流态越倾向于向层流区延伸。由于流量控制的差异, 使得表 1 该趋势表现的并非明显。

#### 3.2 流型

流型是指坡面流是缓流、临界流还是急流。按照清水的一般标准, 如前所述, 可以认为当  $Fr = 1$  时为临界流;  $Fr > 1$  为急流;  $Fr < 1$  为缓流。各组次的计算结果如表 2 所示。

表 1 不同床面状况, 不同流量坡面流的雷诺数

床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.1	0.2	0.3	0.4	1	2	3	4
d= 0	5°	380	679	987	1315	2836	5105	7425	9401
	10°	376	696	1023	1264	3081	5445	7519	9716
	15°	354	700	1046	1369	3008	5278	7551	9717
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.025	0.05	0.075	0.1	0.2	0.4	1	4
d= 0.5~ 1 mm	5°	102	146	261	290	582	1112	2395	8156
	10°	89	212	262	325	710	1236	2757	8281
	15°	91	167	264	335	627	1215	2710	8686
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	1	4
d= 1~ 2 mm	5°	195	269	355	611	923	1239	2806	9237
	10°	179	282	389	675	949	1259	2644	9447
	15°	188	286	389	715	1010	1266	2861	8961
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	1	4
d= 2~ 5 mm	5°	142	249	354	556	830	1100	2512	8647
	10°	191	275	353	661	920	1175	2710	9388
	15°	225	283	394	672	924	1239	2830	9196
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	1	4
d= 5~ 10 mm	5°	202	246	299	633	815	1103	2710	8977
	10°	196	264	320	597	901	1084	2662	8809
	15°	200	255	343	633	949	1155	2713	9213

表 2 不同床面状况, 不同流量坡面流的佛汝德数

床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.1	0.2	0.3	0.4	1	2	3	4
d= 0	5°	3.0	4.0	3.7	4.6	4.8	5.0	5.4	5.7
	10°	4.2	5.2	8.6	5.3	6.1	8.8	8.0	8.7
	15°	3.5	6.0	8.4	8.3	8.9	8.0	8.7	9.6
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.025	0.05	0.075	0.1	0.2	0.4	1	4
d= 0.5~ 1 mm	5°	1.1	1.3	1.6	1.8	2.4	2.9	3.1	3.7
	10°	1.2	2.1	2.2	2.0	3.4	3.9	4.5	4.4
	15°	1.3	1.5	2.3	2.1	2.7	3.9	3.8	5.8
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	1	4
d= 1~ 2 mm	5°	1.1	1.2	1.6	1.7	2.2	2.2	2.5	3.3
	10°	1.3	1.5	1.9	2.1	2.3	2.5	3.4	4.0
	15°	1.9	2.6	3.3	3.8	3.7	4.0	4.2	4.9
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	1	4
d= 2~ 5 mm	5°	0.6	0.7	0.8	0.8	1.2	1.4	1.8	2.7
	10°	1.3	1.5	0.9	1.6	1.7	1.8	2.4	3.8
	15°	1.8	1.8	1.3	1.8	2.8	2.3	3.5	4.0
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	1	4
d= 5~ 10 mm	5°	0.5	0.6	0.6	0.9	1.1	1.2	1.9	2.6
	10°	0.8	0.8	0.9	1.3	1.5	1.2	2.2	3.4
	15°	0.9	1.0	1.2	1.7	2.1	1.8	2.8	3.6

由表2可见, 本试验坡面流的佛汝德数  $Fr$  大致变化在 0.5~9.6 之间。表中相同床面状况, 等流量情况下, 坡度与佛汝德数  $Fr$  呈正势变化, 说明坡面流因坡面阻力较小而趋于急流; 相同床面状况, 等坡度情况下, 随流量增加佛汝德数  $Fr$  呈正比增加, 反映出流量增加也可使水流流型发生改变; 等坡度、相同流量情况下, 随着床面粗糙度的增加, 佛汝德数  $Fr$  呈反势变化, 说明随阻力的增加, 坡面流水流型由急流向缓流发展。

表3中佛汝德数  $Fr$  大都大于1, 处于急流状态, 但随床面粗糙度增加亦出现佛汝德数  $Fr$  小于1的情况, 出现了缓流, 这说明坡面流是一种在急流与缓流之间交替变化的“准临界流”。

表3 不同床面状况, 不同流量坡面流的阻力系数  $\lambda$

床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	2.00	3.00	4.00
$d=0$	5°	0.06	0.03	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
	10°	0.07	0.04	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01
	15°	0.13	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.03	0.05	0.08	0.10	0.20	0.40	1.00	4.00
$d=0.5\sim 1\text{ mm}$	5°	0.48	0.32	0.19	0.17	0.08	0.05	0.04	0.02
	10°	0.96	0.25	0.23	0.25	0.09	0.06	0.04	0.03
	15°	1.05	0.76	0.31	0.35	0.20	0.09	0.08	0.03
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	4.00
$d=1\sim 2\text{ mm}$	5°	0.44	0.33	0.20	0.17	0.10	0.09	0.06	0.03
	10°	0.68	0.44	0.27	0.22	0.17	0.14	0.07	0.04
	15°	0.47	0.25	0.15	0.11	0.11	0.09	0.07	0.04
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	4.00
$d=2\sim 5\text{ mm}$	5°	1.27	0.87	0.72	0.59	0.29	0.20	0.10	0.04
	10°	0.67	0.49	1.07	0.34	0.30	0.24	0.13	0.04
	15°	0.49	0.50	0.84	0.41	0.18	0.13	0.10	0.06
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	4.00
$d=5\sim 10\text{ mm}$	5°	1.77	1.24	1.13	0.49	0.35	0.27	0.10	0.04
	10°	1.67	1.44	1.17	0.54	0.37	0.53	0.14	0.05
	15°	1.74	1.51	0.98	0.46	0.29	0.38	0.14	0.07

相同床面状况和流量下, 应该说坡度增加时, 阻力系数增大, 意味着水流提供的能量越多, 消耗也越多。而表中部分阻力系数未随坡度增加而增大, 可能是由于变换坡度后流量控制精度所致; 由于通过调节阀控制流量, 而每次调节出的实际流量都很难控制到设计流量, 难免存在每个坡度的实际流量都在设计流量附近浮动的事实; 流量的变化引起流速的变化, 而流速和阻力系数的平方成反比, 所以流量的变化对阻力系数的影响最大。

### 3.3 阻力与流速

坡面流的阻力, 目前通常用式(9)计算, 由于该试验为定床阻力试验, 流速为平均流速, 采用式(4)计算而来, 所以阻力也一样, 反映的是整个人工粗糙床面的综合效果。

由表3可见, 当床面状况不变的情况下, 坡面流的阻力系数主要随流量和坡度变化。对于同一坡面, 流量不同, 雷诺数由89升至575, 阻力系数随流量增加而减小, 这是层流区的一般特征; 雷诺数由575升至9717, 阻力系数无明显变化, 这与过渡区和紊流区(紊流光滑区、紊流过度粗糙区和紊流粗糙区)的基本特征相符。相同坡度, 相同流量情况下, 随床面粗糙度的增加阻力系数逐渐增大。

本试验为定床阻力试验, 由于床面不能变形, 因此要消耗能量就必须增大流速, 所以说, 平均流速是阻力的另一种表达形式。

本试验为梯形水槽试验, 由流量与水深关系即可计算出平均流速。由表4可见, 同一坡面下, 随着流量增加流速相应增大; 同一床面和同一流量下, 随着坡度增加流速增大。同一坡度和流量下, 床面越粗糙, 水流流速越小, 这说明水流克服阻力做功所消耗的能量越来越多。

表 4 不同床面状况,不同流量坡面流的平均流速

m/s

床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	2.00	3.00	4.00
d=0	5°	0.36	0.53	0.58	0.74	1.04	1.36	1.63	1.85
	10°	0.44	0.64	1.01	0.81	1.26	1.96	2.11	2.46
	15°	0.39	0.70	1.00	1.10	1.57	1.85	2.24	2.62
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.03	0.05	0.08	0.10	0.20	0.40	1.00	4.00
d=0.5~1mm	5°	0.12	0.15	0.22	0.24	0.38	0.54	0.76	1.41
	10°	0.11	0.23	0.26	0.27	0.50	0.66	0.99	1.56
	15°	0.13	0.17	0.27	0.28	0.41	0.66	0.88	1.87
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	4.00
d=1~2mm	5°	0.15	0.18	0.23	0.29	0.41	0.46	0.69	1.30
	10°	0.15	0.21	0.27	0.35	0.42	0.50	0.81	1.48
	15°	0.20	0.29	0.38	0.52	0.59	0.67	0.96	1.66
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	4.00
d=2~5mm	5°	0.09	0.13	0.15	0.19	0.27	0.33	0.55	1.13
	10°	0.16	0.20	0.17	0.30	0.35	0.41	0.66	1.44
	15°	0.21	0.23	0.21	0.32	0.47	0.59	0.85	1.47
床面状况	坡度	流量/(L·s <sup>-1</sup> )							
		0.05	0.08	0.10	0.20	0.30	0.40	1.00	4.00
d=5~10mm	5°	0.09	0.11	0.12	0.21	0.25	0.30	0.58	1.12
	10°	0.12	0.14	0.16	0.25	0.32	0.30	0.64	1.31
	15°	0.13	0.15	0.19	0.30	0.40	0.39	0.72	1.37

## 4 结论

(1) 一般情况下,随着床面状况、流量和坡度的影响,坡面流在其流动的不同时期可分别表现出层流、过渡流和紊流 3 种流态,而不仅仅表现为一种单独的流态。相同坡度,相同流量,床面越粗糙,坡面流流态越倾向于向层流区延伸。

(2) 坡面流是一种在急流与缓流之间交替变化的“准临界流”。等坡度、相同流量情况下,随坡面粗糙度增加水流流型由急流向缓流发展。

(3) 同坡度、等流量情况下,随床面粗糙度的增加阻力系数逐渐增大,水流流速减小,水流克服阻力做功所消耗的能量越来越多。

(4) 坡面流因其水深特浅,流态复杂,流速难以观测,虽有不少研究成果,但其基本水动力特性尚存疑颇多,需进行更进一步的研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 沈冰,李怀恩,沈晋,等. 坡面降雨漫流过程中有效糙率的实验研究[J]. 水利学报,1994,(10): 61—68.
- [2] Engman E T. Roughness coefficient for routing surface runoff[J]. J I D Eng, ASCE, 1986, 112(1): 39—54.
- [3] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草地坡面水动力学特性及

其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4): 264—267.

- [4] 刘春晶,李丹勋,曲兆松,等. 过渡区动床明渠流的流速分布[J]. 水科学进展,2006,17(1): 49—54.
- [5] 范家掩,史伏初,郑浩杰. 灌区量水设备[M]. 北京: 水利水电出版社,1992.
- [6] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社,2002.
- [7] 陈椿庭. 关于明渠水流的六区流态[J]. 人民长江,1995,26(3): 43—46.
- [8] 沙际德,白清俊. 粘性土坡面细沟流的水力特性试验研究[J]. 泥沙研究,2001(6): 39—44.
- [9] 李振山,陈广庭. 粗糙度研究的现状及展望[J]. 中国沙漠,1997,17(1): 99—102.
- [10] 郑子成,何淑勤,吴发威,等. 地表粗糙度与水力糙率系数的关系[J]. 山地学报,2004,22(2): 236—239.
- [11] 杨明元. 对地表粗糙度测定的分析与研究[J]. 中国沙漠,1996,16(4): 383—387.
- [12] 王忆龙,吴文明,孙宗胜. 关于水力计算糙率系数确定方法的探讨[J]. 黑龙江水利科技,1999(4): 13—14.
- [13] 张志强,王礼先,余新晓,等. 渗透坡面林地地表径流运动的有效糙率研究[J]. 林业科学,2000,36(5): 22—27.
- [14] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报,2006,36(3): 371—377.
- [15] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京: 水利电力出版社,1984.