

# 坡面流速的试验研究

江忠善 宋文经

## 提 要

本文首先对于现有各种坡面流速公式作一简单概述,进而简介坡面流速的试验布置。根据不稳定流计算理论,对试验资料进行了整理分析,得到下列的坡面流速公式:

$$V = kq^{0.5}I^{0.35}$$

式中:  $q$  —— 单宽流量(立方厘米/秒·米);  $I$  —— 坡面的坡度比值;  $V$  —— 相应于  $q$  和  $I$  的坡面流速(厘米/秒);  $k$  —— 系数,是随坡面的表面特征而异,在本试验裸地条件下  $k$  为 2.0。

然后,在试验给定的流态和公式的基础上,结合应用现有坡面流速公式,反求  $k$  值。按地表特征分类归纳,取其平均值为采用值。

## 一、前 言

在解决许多问题时,例如计算坡面汇流和坡面冲刷问题等,必需先要知道坡面流速。因此对坡面流速的研究,具有很大的实际意义。也正是由于这个原因,许多学者对此问题做过一些试验研究,但依据的试验资料有限,而且各家公式的差异很大,地表类型亦不全。我们在研究坡面水土流失过程中,坡面流速是其中一个重要的环节。决定坡面流速的主要因素是地表特征、坡度和坡面水深(或坡面流量)3项。其中各种自然地表特征差异很大,需要大量的实测资料,且在实验场上难以模拟各种地表状况的试验条件。因此,我们在考虑坡流流态基础上,将各家公式换算成统一参数及单位进行比较。然后,在试验所确定的指数基础上,反求经验系数  $k$ 。将同类地表的系数值平均,即得所需该类地表的平均  $k$  值。显然,这些是近似的结果,尚待今后实测资料的检验。我们的工作只是初步的尝试,缺点想必很多,恳希有关方面多予指正。

## 二、问题的现状

目前国内外坡面流速计算公式很多。各学者都在自己独立的坡流试验基础上,得到了坡面水流的流速公式。这里只列举一些有代表性的流速公式:

1. M. M. 普罗托季亚科诺夫(Протодьяконов, 1930)<sup>[1]</sup>进行草地坡面试验56次,单宽流量为0.4—9.5升/秒,坡度为2.5—270‰,经分析得到草地流速公式:

$$V = kA^{1/2}I^{3/10} \quad (1)$$

式中:  $A$  —— 每公里单宽坡面上的流量(立方米/秒·公里);

$I$  —— 坡面坡度(‰);

$k$  —— 系数,等于0.0425。

2. П. А. 杜德金 (Дудкин, 1937)<sup>[2]</sup> 在两种类型坡面上进行了坡面流速观测。试验槽宽 1 米和 2 米, 坡长 10 米, 得出下列的流速公式:

无植被人工坡面:

$$V = 46.42h^{0.67}I^{0.5} \quad (2)$$

有植被的坡面 (植物高 5—7 厘米):

$$V = 61.23h^{0.67}I^{0.83} \quad (3)$$

式中:  $V$ ——流速 (米/秒);

$h$ ——水层深度 (米);

$I$ ——坡度比值。

3. Н. Я. 波德维欣斯卡娅 (Подвишенская, 1948)<sup>[3]</sup> 根据普罗托季亚科 诺夫的草地坡面观测数据, 整理得到下列流速公式:

$$V = 10q^{2/3}I^{1/3} \quad (4)$$

式中:  $V$ ——流速 (米/秒);

$q$ ——单宽流量 (立方米/秒·米);

$I$ ——坡度比值。

4. 徐在庸等<sup>[4]</sup> 进行了坡地草地及光地试验 56 次, 平均径流强度为 0.19—2.13 毫米/分, 坡度为 5—300‰ 六种。经分析得到下列坡面流速公式:

$$V = kq^{1/2}I^{1/3} \quad (5)$$

式中:  $V$ ——平均流速 (厘米/秒);

$q$ ——单宽流量 (公升/分·米);

$I$ ——坡度比值;

$k$ ——系数, 草地  $k = 3.0$ , 光地  $k = 7.5$ 。

5. Д. П. 佑涅维奇 (Юневиц, 1937)<sup>[5]</sup> 在各种坡面条件下, 进行了坡面薄层水流流速的观测, 试验槽宽 0.5 米, 坡长 12 米。对各种类型的坡面, 得到下列平均流速公式:

$$V = Ah^i I^j \quad (6)$$

式中:  $V$ ——平均流速 (米/秒);

$h$ ——水层深度 (米);

$I$ ——坡度比值;

$i, j$ ——水层深度和坡度的指数;

$A$ ——系数。

佑涅维奇流速公式表明, 坡面上的植物和地表不平整性对坡面水流阻碍影响愈小, 则水流接近紊流的程度愈大; 反之, 坡面愈不平整和植被愈稠密, 则坡面水流愈接近层流。

6. Г. Н. 什维布斯 (Швебс, 1966)<sup>[6]</sup> 根据人工降雨和文献资料, 研究给出下列坡面流速公式:

$$V = m_0 h^{0.5} L^{0.4} I^{0.3} \quad (7)$$

式中:  $V$ ——流速 (厘米/秒);

$h$ ——径流强度 (毫米/分);

$L$ ——坡长 (米);

$I$ ——坡度比值；

$m_0$ ——坡面粗糙系数。

上述各家公式中所用参变量各不相同，有的用单宽流量、坡度表示的，有的用水深、坡度表示的，也还有用径流强度、坡长、坡度表示的。

各家公式中参变量指数又各不相同。根据水流连续方程，单宽流量  $q = Vh$ ，上述公式都可化为下列统一形式：

$$V = kq^n I^m \quad (8)$$

如以水深表示时：

$$V = k_1 h^i I^j \quad (9)$$

式中： $i = n/(1-n)$ ； $j = m/(1-n)$

将各家公式化为式(8)、(9)形式，以便于和层流、紊流时的公式进行比较，如表1。

表 1 各家公式中的指数的比较

指数 \ 公式	式(1)	式(2)	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)	层流式	曼宁公式
$n$	0.5	0.4	0.4	0.67	0.5	变数	0.67	0.40
$m$	0.18	0.3	0.45	0.33	0.33	变数	0.33	0.30
$i$	1.0	0.67	0.67	2.0	1.0	变数	2.0	0.67
$j$	0.36	0.5	0.83	1.0	0.67	变数	1.0	0.50

由表1可知：波德维欣斯卡娅公式的指数与层流公式相同；杜德金在无植被坡面上流速公式与紊流公式完全相同；而其他各家公式中，指数 $i$ 值亦都在2.0(层流)—0.67(紊流)的范围内变化， $j$ 值也大多在1.0(层流)—0.5(紊流)的范围内变化。由此可见，不同的学者之所以得出指数不同的公式，主要在于进行试验的条件不同，有的在层流条件下进行，有的在紊流条件下进行，有的则可能在层流到紊流的过渡流条件下进行。如果再考虑到由于坡面地表情况的非均匀性，必然导致坡面水流的不均匀性出现等因素时，则上述指数的分散也就不足为怪了。因此，在应用这类公式时，就必须根据实际情况加以审慎的选择。

### 三、试验的布置

此试验是在室内坡流试验槽上进行的。试验设备主要由坡流试验槽、人工模拟降雨装置与测流设施3部分组成。

坡流试验槽净长5米，宽1.46米，深0.6米。槽内人工填铺黄土母质，厚0.5米，同时，在槽底与黄土母质间铺有一层粗沙渗水层，经由排水孔排除渗水。

槽身底部钢架支持在底盘转动铰座上，由手工操作槽末端的悬吊倒链升降试验槽，使坡面坡度可在0—30°范围内变动。

人工模拟降雨装置主要由喷头、降雨支架、供水及输水设备4部分组成。通过实验厅楼顶上的稳压水箱供水，总输水管道进入实验厅后分叉，与降雨支架衔接。供水箱高出地面11.6米，降雨支架顶部喷头距地面4.5米。

我们采用的是单向喷洒折射式喷头, 它主要由碎流器和孔板组成。碎流器采用方侧平的折面形式, 折面的外折角为 $165^\circ$ , 将输水管路中的压力水流逼向一侧, 喷射分散成水滴, 控制降雨的均匀性和受雨面积。通过孔板孔眼的大小控制降雨强度和雨滴大小, 喷洒雨滴距地面为6米(支架高4.5米, 喷头喷高1.5米)。

测流设施分为径流量和流速测定两方面。在试验槽末端下方地下室, 安置集流桶, 用体积法测定径流量。流速测定是在坡面槽的首端0.7米和末端4.7米处设置两个测流断面, 采用食盐溶液作指示剂, 用电导仪来测定各断面上水的导电性变化的方法, 测定试验槽坡面水流中在上断面前滴入的食盐溶液流经上下断面所用的时间, 从而间接测定坡面流速。一种流量, 重复测速3—5次, 取其平均值, 得出断面间平均流速。

坡面流速测定是在稳渗条件下进行的。试验的地面坡度为 $3^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $25^\circ$ 六种, 每种坡度各用1.13—3.69毫米/分5种降雨强度来进行试验。地面为裸地, 共试验60次。平均单宽流量为76.2—456.6立方厘米/秒·米, 实测平均流速为5.98—29.9厘米/秒。

#### 四、试验资料的分析

目前在坡面流计算理论上按稳定流和不稳定流两种观点。我们考虑到坡面径流多呈细沟流, 其流速较一般薄层水流为大, 并且受到坡面上微地形及侵蚀沟发育等因素的影响, 故按不稳定流考虑。根据不稳定流理论推算, 坡面平均流速等于坡脚断面的平均流速。于是, 坡面平均流速可用下列形式为试验资料的分析基础:

$$V = kq^n I^m$$

式中:  $V$ ——平均流速, 以厘米/秒计;  $q$ ——单宽流量, 以立方厘米/(秒·米)计;  
 $I$ ——坡面坡度, 以高差对水平距离的比值计;  $k$ ——坡面阻力系数;  $n$ 、 $m$ ——流量与坡度的指数。

根据试验数据(见图1、图2), 通过回归分析求得:

$$V = 2.0q^{0.5}I^{0.35} \quad (10)$$

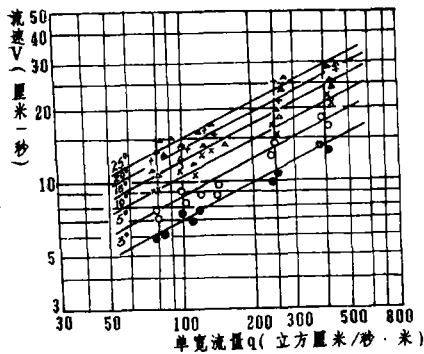


图1 流速 $V$ 与单宽流量 $q$ 关系

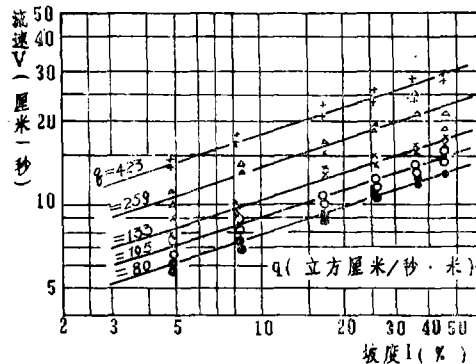


图2 流速 $V$ 与坡度 $I$ 关系

以式(10)计算值与实测值比较, 相关系数 $r = 0.986$ , 平均误差为 $\pm 5.3\%$ , 说明计

算值与实测值很一致。

我们由试验数据确定 $q$ 和 $I$ 的指数,说明雨水沿坡地的流动是介于层流到紊流的过渡流。与国内外的有些公式结论基本上是一致的,特别和国内徐在庸公式的指数比较接近。各自进行的坡流试验,最后得出基本一致的结论,显然这个结果是比较符合实际的。但是与有些公式差别甚大,例如苏联普罗托季亚科诺夫公式中采用的 $n = 3/16$ 。

资料分析还表明,当流量和坡度增大到一定程度后,试验点据关系离散范围比较大。从试验时的观察,可以这样认为:由于小区坡面情况的非均匀性,必然导致水流的不均匀性流动出现,继而产生细沟流。当流量和坡度较小时,坡面细沟流分布很密,深度和宽度都很小,细沟槽床形态并不十分明显,而且它的位置也极不固定,时而出现或消失,时而左右迁移。因此,它实际上也是起了对整个坡面的薄层片流作用。但当流量和坡度继续增大到一定程度后,随着雨水径流侵蚀冲刷作用增大,便出现了纵向细沟兼并现象。其结果导致大细沟吞并小细沟,使细沟间的水流大部分横向溢流向较大的侵蚀沟,导致水流主要集中在若干细沟中流动。此时沟槽不断扩张刷深,并在坑洼处形成很多急流跌水。在这种情况下,观测的坡流结果必然变动范围大,在天然坡面上也可见到这种现象。坡面细沟发育程度对坡流影响及相互的关系,有待今后进一步试验查明。

## 五、坡流参数 $k$ 值的拟定

坡流的参数 $k$ 值,主要取决于坡面的地表特征。它们的数值可由各种地表类型的坡流试验和分析实测径流资料来确定。

铁道部科学研究院西南研究所和中国科学院地理研究所<sup>[7]</sup>前后做了几种不同地表土壤植被类型的坡流试验,但远不能包括地表的主要类型特征。这需要大量的试验资料,且在试验场上难以模拟各种地表状况的试验条件。

文献资料中,虽然没有一家提出完整系统的各种地表类型坡流公式,但将各家公式汇总起来就基本上概括了主要的地表类型。为此,我们首先将各家坡面流速公式换算成相同的因子与单位,即均用单宽流量 $q$ (立方厘米/秒·米)和坡度 $I$ (比值)表示流速 $V$ (厘米/秒),换算结果如表2所示。然后根据不同地表类型状况分类,分析其规律性。结果表明,同类地表类型与被覆,地表的系数 $k$ 值本身不仅不象原来那么有显著差别,而且 $q$ 和 $I$ 的指数值都对 $k$ 值的相互接近起着影响作用。

为了求得同类地表特征系数 $k$ 的平均值,我们采用一组能产生较大流速(径流强度2.0毫米/分,25°的100米坡长)和一组能产生较小流速(径流强度0.15毫米/分,5°的20米坡长)的自然条件,代入各家公式计算流速,然后根据计算流速值,应用我们试验建立的坡流结构形式(10)反求 $k$ 值。最后,将同类地表的系数 $k$ 值平均,即得所需该类地表类型的平均值 $k$ 。

现将各种地表状况下的 $k$ 值综合列于表3中。

显然,以上述作法拟定出的表3中的 $k$ 值是近似的结果。是否完全符合实际情况,尚待今后试验的资料充实和检验。

表 2

主要坡面流速公式换算结果表

(一) M.M.普罗托季亚科诺夫公式 (1930)		
1—1 浅草覆盖		$V = 0.49q^{0.5}I^{0.18}$
(二) П.А.杜德金公式 (1937)		
2—2 无植被的人工坡面		$V = 4q^{0.4}I^{0.3}$
2—3 有植被 (高 5—7 厘米) 的坡面		$V = 4.72q^{0.4}I^{0.5}$
(三) Д.П.佑涅维奇公式 (1937)		
3—4 良好的纵向犁沟翻耕地		$V = 12.6q^{0.33}I^{0.6}$
3—5 良好的横向犁沟翻耕地		$V = 12.6q^{0.28}I^{0.65}$
3—6 新翻耕地, 并加以耙平		$V = 3.23q^{0.43}I^{0.52}$
3—7 割除草皮地		$V = 1.28q^{0.53}I^{0.42}$
3—8 丛生密草地		$V = 0.07q^{0.67}I^{0.33}$
(四) Н.Я.波德维欣斯卡娅公式 (1948)		
4—9 浅草覆盖		$V = 0.1q^{0.67}I^{0.33}$
(五) Г.Д.罗斯托莫夫公式 (1959)		
5—10 无植被被覆的坡面		$V = 2.68q^{0.5}I^{0.5}$
5—11 部分有草的坡面		$V = 0.79q^{0.5}I^{0.3}$
5—12 草皮坡面		$V = 0.69q^{0.5}I^{0.3}$
5—13 厚草层的坡面		$V = 0.56q^{0.5}I^{0.3}$
(六) 林平一公式 (1958)		
6—14 压得很平的坡面		$V = 4.2q^{0.4}I^{0.3}$
6—15 平坦稀疏的草地		$V = 3.07q^{0.4}I^{0.3}$
6—16 农田		$V = 2.4q^{0.4}I^{0.3}$
(七) 徐在庸等公式 (1962, 1978)		
7—17 硬板光地		$V = 3.48q^{0.5}I^{0.33}$
7—18 裸地		$V = 1.83q^{0.5}I^{0.33}$
7—19 一般草地		$V = 0.732q^{0.5}I^{0.33}$
7—20 中等草地		$V = 0.6q^{0.5}I^{0.33}$
7—21 灌木密草地		$V = 0.41q^{0.5}I^{0.33}$
(八) Г.В.卡斯佐夫公式 (1963)		
8—22 天然草地, 被覆100%, 高 8—5 厘米		$V = 0.55q^{0.6}I^{0.3}$
8—23 天然草地, 被覆100%, 高 10—12 厘米		$V = q^{0.5}I^{0.4}$
8—24 谷物收割后留茬地		$V = (4.7-9.4)q^{0.3}I^{0.3}$
8—25 地面略平整的耕地		$V = 4q^{0.4}I^{0.3}$
8—26 人工平整地面		$V = 4.4q^{0.4}I^{0.3}$
8—27 耕松地面		$V = 3.55q^{0.35}I^{0.2}$

表 3

坡面粗糙度系数 k 值表

坡 面 地 表 状 况	k 值	来 源 (见表 2)
天然无植被压实坡面	3.50	6—14, 7—17
未耕耘的裸地, 人工平整地表	2.25	2—2, 5—10, 7—18, 8—26
耕松地表 {	良好的纵向犁沟翻耕	3—4
	良好的横向犁沟翻耕	3—5
	一般翻耕, 并加以耙平	3—6, 8—25, 8—27
谷物收割后留茬地	2.00	3—7, 8—24
谷类作物地	1.50	2—3, 6—16
一般稀疏草地	0.9	5—11, 7—19, 8—22
中等密度草地	0.7	1—1, 5—12, 7—20
稠密深草地	0.5	3—8, 4—9, 5—13, 7—21, 8—23

## 六、小 结

坡面流速问题是坡面水土流失计算中一个重要的不可忽视的问题。为了合理地解决这个问题,我们通过人工降雨坡流试验和综合归纳文献资料中各种地表类型的  $k$  值变化,初步拟定了各种不同地表类型的坡流计算公式,可供有关部门参考试用。

坡流是一个复杂的问题,要全面地解决这个问题,除要进行不同地表类型的试验外,还要研究坡面地表细沟发育程度对坡流汇流速度的影响。这些问题,有待今后进一步试验研究。

### 参 考 文 献

- [1] М.М.普罗托季亚科诺夫:地面径流现代理论基础,《水流与渗流的研究译丛》,2—46页,人民铁道出版社,1958年。
- [2] Дудкин, П.А.: Скорости стекания воды по поверхности водосбора и методы их изучения, “метеорология и гидрология”, №.9, 1937.
- [3] Н.Я.波德维欣斯卡娅:小流域上降雨洪水损失的分析,《水文译文集第一集》,水电部水文局译印,1960年。
- [4] 徐在庸等:地面径流的试验研究,《水利学报》,1962年第4期,1—8页。
- [5] Юневич, Д.П.: О скоростях стекания воды по поверхности тонким слоем, “метеорология и гидрология”, №.9, 1937.
- [6] Швебс, Г.Н.: Вопросы расчета поверхностного стока, Труды I всесоюзного гидрологического съезда, том 5, 1960.
- [7] 小流域暴雨径流研究组:《小流域暴雨洪峰流量计算》,科学出版社,1978年。

## An Experimental Study on the Velocity of Slope Flow

Jiang Zhongshan Song Wenjing

### Abstract

This paper is based on the calculating theory of unsteady flow, an experiment was performed in a flume and obtained the following formula by analysing the experimental data:

$$V = kq^{0.6}I^{0.85}$$

where  $q$  is the unit discharge ( $\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{m}$ ),  $I$  is the ratio of slope gradient ( $\text{m}/\text{m}$ ),  $V$  is the velocity of slope flow ( $\text{cm}/\text{sec}$ ), and  $k$  is the coefficient of resistance of slope (see the table 3 in the paper).

In this paper the author used the calculating method to determine the  $k$  value. First, under the known conditions of  $q$  and  $I$  to calculate the  $V$  by applying different formulas of the velocity of slope flow at home and abroad, second, using the formula given above to find the  $k$  value, finally, to classify the  $k$  value based on the same condition of feature of slope.