

# 坡流类型及坡地水力侵蚀计算方法

谢承迪

(合肥工业大学, 合肥市 230009)

**摘要** 从紊流力学与山坡水文学观点出发,研究了坡面流类型、坡地冲刷与坡形演变的力学机制,提出了关于坡地动力学的一些基本原理和计算坡地冲刷的实用方法。从而可从成因上估算裸露地表或植被条件下的冲刷强度,为水土保持工程设计、流域综合治理规划提供理论依据。

**关键词:** 坡面紊流 坡流类型 坡地冲刷

文章编号: 1000- 288X(1999)04- 0001- 06

文献标识码: A

中图分类号: S157.1

## Types of Hillside Flow and Calculation Method of Hillside Scouring

XIE Cheng-di

(Hefei Polytechnic University, Hefei 230009, PRC)

**Abstract** The types of hillside flow, the scouring mechanism and evolution of the profile form are studied on the basis of turbulent mechanics and hillside hydrology theory. Some basic concepts of hillside dynamics and theoretical calculation method of hillside scouring are put forward. By the method, the scouring intensity can be estimated for naked or vegetation-covered surface from the formation causes. The works also provide a scientific base for designs of soil and water conservation projects and comprehensive control plan.

**Keywords** turbulent flow on hillside; types of hillside flow; hillside scouring

### 1 坡地流分类及水力侵蚀机理

暴雨坡地流一般属片流或沟流,是长期争论的基本问题。通常所见的水冲沟无疑是雨洪在微地形控制下沟蚀的结果。产生沟蚀的条件如下: (1) 雨强要足够大或坡表土质疏松,易被冲蚀 (2) 坡面原具有窄深形沟槽,使流动耗能于底部较多,以垂向侵蚀为主,切深初始沟槽。相反在原宽浅凹槽中,水流横向摆动耗能较多,以侧蚀为主,沟蚀不易发展,而向片蚀发展。(3) 具有较大水力阻抗的纵剖面形状,当坡面具某种抛物线型形状时,其阻抗和冲刷力可达最小(即水力最优剖面)一般坡表大多具有 2 个转折点,上、下部为缓坡,中部为陡坡,如图 1 所示。纵剖形态与最优剖面差异愈大,则所受水流切力愈大,沟蚀将愈明显,尤以 2 转折部位为甚。据巴氏阻抗公式  $f^* = \Delta h / Q^2$

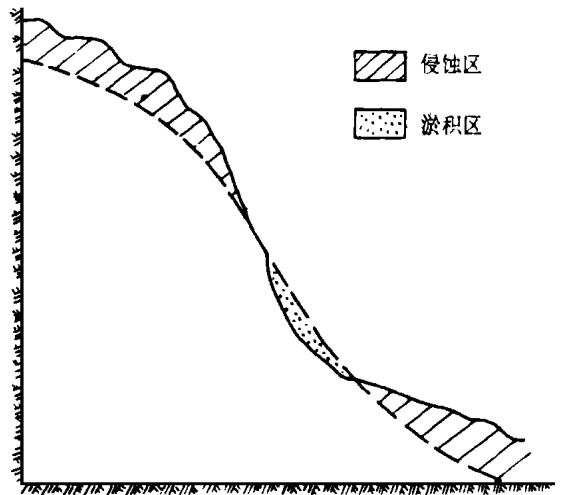


图 1 坡面的一种冲淤分布形式

可知,阻抗  $f^*$  随水流落差  $\Delta h$  而增大,故在坡的上部转折处最易受强冲蚀,下部转折处冲刷较弱,中部则易发生淤积。故知坡面经受长期侵蚀后,其形状会趋近于最优剖面而达平衡态,同时冲刷显著减弱。因形成沟蚀的条件较严,相对于片蚀发生的机会较少。我国黄土高原的土质地貌及暴雨特性很适宜于它的发育,其梁、梁峁、峁等显现了典型的沟蚀景观。

由于一般坡面流,特别在坡中下部,大都呈紊流态。据紊流边界层理论,在水深较糙凸高 ( $\Delta$ ) 足够大,呈片流态时,在糙凸背水缘处,流动分离,产生紊动涡旋,水流中的较大泥沙颗粒将沉积于后缘凹陷处,使坡面渐趋“光滑化”,而不生成新的细冲沟。当水深小于  $\Delta$  时,可呈沟流态,但在雨强小、坡面缓或土质坚硬区,沟蚀也难以发展。埃米特、利奥波德等曾做过长期观测<sup>[1]</sup>,他们称“多年中从未见有细冲沟产生,但坡表侵蚀却能达  $3.53 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,占总产沙量的 98%”,“在一般地区沟蚀也不常见”,但未找到原因。而上述机理正可给予合理的解释。

在上述适宜条件下,如雨强不大,水深较浅,则不能形成片流,而呈平行状或交叉状的沟槽网流,属窄明渠槽流型,在此命为“I 型坡流”。它有一个从生成到淤平的过程。在不利于沟蚀条件下,由于水流侧蚀作用,坡面沟槽将变浅、宽,坡面沿流向也有相当起伏,从而构成分割水流的“岛群”。当水深小于糙凸高度时,它是以大糙凸为分隔的网状宽线流,其分支流的宽度可与长度相比拟,属宽明渠槽流型,这在陡坡的中小雨期常见到。由于受散布“岛”的阻隔,流动压力沿程变化,严格说,它是不均匀流和剪切紊流,不能以均匀流、自由紊流描述。

若坡面较平滑,土壤透水性差,暴雨期水深可明显大于糙凸高度而呈片流。其坡面阻力仅影响水流底部,上部为自由紊流,宽度也可与长度相比拟。据美国怀俄明州坡地试验场观测<sup>[1]</sup>,坡上部呈层流态,向下部渐转变为紊流,这表明边界层厚度随流程是逐渐增大的。这些现象都符合平板上水流边界层的特点,其流速垂向分布和阻力变化规律可用此模式表示,称它为III型坡地流。

在类似上述地貌、土质情况下,若水深不过大于糙凸高度,坡面阻抗能影响水流全层,且忽略水力要素沿横向的变化,则流动近似遵循于宽明渠紊流方程:

$$gJ + \frac{d}{dz} \left[ \rho \left( \overline{v_x'} \frac{dv_x'}{dz} \right) - \overline{v_x' v_z'} \right] = 0 \quad (1)$$

沿垂向积分,并取底界处  $v_x' = v_z' = 0$ ,得

$$v_*^2 (1 - z/h) = v \left( \overline{v_x'} \frac{dv_x'}{dz} \right) - \overline{v_x' v_z'} \quad (2)$$

式中:  $J$ ——坡面坡度;  $v_x', v_z'$ ——沿流向、垂向的脉动流速;  $\overline{v_x'}$ ——沿流向的时均流速;  $v$ ——水的运动粘性系数;  $h$ ——水深;  $v_*$ ——摩阻流速,其量为  $\sqrt{ghJ}$ 。此浅片流属宽浅明渠槽流型,仅  $\Delta/h$  比较后者更大,从而具有更均匀化的对数型垂向流速分布与更大的阻力系数、底界阻抗。命它作“II 型坡面流”。

坡面流水深通常较小,但底坡甚大,故  $v_*$  值与河、渠流大多同量级,但雷诺数比后者小 2~3 个量级,紊动强度较后者弱。在粗糙的缓坡上,发生过渡型流态的机会可能多于完全紊流型坡流的糙率雷诺数  $R_b$  与宽渠、槽同属  $10^2 \sim 10^3$  范围,但比后者明显大些,故底界阻力对流动的影响更大。因二者的  $R_b$  都超过临界值 100,在边界处均有流动的分离,属阻力平分区,阻力系数与雷诺数无关,只随粗糙度变化。因坡地水深较河渠显小,  $R_b$  值也小,但坡地糙度一般较之甚大,故临界  $R_b$  值也甚小,因此坡地流大多也是紊流态。

## 2 坡地流动计算方法

当降雨使土表接近饱和时可产生坡面水流。设坡地顶端处入流量与水深为 0,则坡地下端

出流流量为

$$Q(t) = A [\partial h / \partial t + i(t) - f_s] \quad (3)$$

式中:  $t$ — 时间;  $A$ — 坡面面积;  $i$ — 瞬时雨强;  $h$ — 水深;  $f_s = 3h$ , 为产流后瞬时入渗程度;  $s$ — 依赖于土质, 为雨前含水量的无因次参数

按维里康诺夫公式<sup>[4]</sup>, 坡地某一点的漫流速度是

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

式中:  $q$ — 单位宽度的流量;  $J$ — 底坡。以  $v = q/h$  代入之得下端水深

$$h_s = 0.1(q_s J)^{1/3} \quad (5)$$

据本型坡地流特点, 水力半径  $R \approx h$ , 将谢才公式和流速系数  $C = (1/h)R^{1/6}$  代入 (4) 中得

$$v = 10n^{-2/3} h^{10/9} J^{2/3} \quad (6)$$

设坡地宽为  $b$ , 当流动达稳态时,  $\partial h / \partial t = 0$ , 由式 (3), (5) 推得关于下端流量的方程

$$q_s = A/b [i(t) - 0.055(q_s J)^{1/3}] \quad (7)$$

由于重力作用, 水深、流量沿坡流向呈抛物线型增长, 故有

$$\bar{q} = X A b^{-1} [i(t) - 0.055 J^{-1/3} (\bar{q} / X)^{1/3}] \quad (8)$$

代入得

$$\bar{h} v = X A b^{-1} [i(t) - 0.055 J^{-1/3} (\bar{h} v / X)^{1/3}] \quad (9)$$

式中:  $X = \bar{q} / q_s$ ,  $\bar{q}$ — 坡地面平均流量;  $\bar{h}$ ,  $v$ — 坡面平均水深、流速。

代 (6) 于上式得求  $\bar{h}$  的方程如

$$10 J^{2/3} n^{-2/3} \bar{h}(t) + 0.1085 A X^{2/3} b^{-1} J^{-1/9} n^{-2/9} \bar{h}(t)^{19/27} = X A b^{-1} i(t) \quad (10)$$

式中:  $n$ — 坡面糙率。据观测资料识别得参数值后, 由雨强便可求得水深  $\bar{h}$ , 代入到式 (6) 即得  $v$  值。本法反映了坡流蓄泄关系和阻力变化特征。由于坡地调蓄作用不大, 同瞬时雨强与流速、流量的对应性较好, 可依稳定流概念简化表示二者间关系。另由式 (6), (8) 可得出平均水深为

$$\bar{h} = 0.336(n/J)^{0.316} \bar{q}^{0.474} \quad (11)$$

### 3 坡地冲刷计算方法

如前述, 在多数情况下, 坡面流的阻力规律属粗糙区类型, 光滑区与层流型只出现在少数时空域 (如坡顶部或小雨强、平滑坡面)。埃米特据糙坡上的宽浅紊流试验认为, 因近底面处流速很小, 而所占厚度较大, 该处仍是层流态。但在糙度及  $R_\Delta$  甚大时, 流动不稳定性显著, 则贴底层也多呈紊流态, 虽流速仍相当小, 但冲刷强度却明显增大。此点已经后来的紊流试验观测证实<sup>[2]</sup>, 说明传统的层流附面层理论有误。就下述的 II 型坡流而言, 因其水深比糙凸高不太大, 坡面摩阻对全层流动的制约更较宽浅槽流为强, 更无自由流区存在的可能, 其力学特性接近于甚宽浅型明渠槽紊流, 而显异于层流边界层模式, 是无自由流区的紊流边界层型。如沿横向流动要素的变化不大, 可近似作宽浅明渠槽流处理之。

在水力粗糙区, 单位面积坡表所受水流切力  $\tau$  为

$$\tau = 1/2 \lambda (\Delta/h) \rho v^2 \quad (12)$$

式中:  $v$ — 断面平均流速;  $\Delta$ — 当量糙度, 其阻力系数与实际边界相当;  $\lambda$ — 阻力系数, 表征边界摩阻影响, 随相对糙度变化。如前述,  $\lambda (\Delta/h)$  关系可移用宽明渠 (槽) 试验结果, 因二者的动力特性基本相似。

上式系按边界为绝对固结和刚性的假定得出。实际上, 无论渠槽或坡地, 其表面都具可蚀

性和变形性。流动阻力还随坡表颗粒结合紧密度  $F_s$  增大而增加,水流耗能也愈多,流速和冲刷量均减少。即在相同糙度条件下,冲刷强度是与阻力系数呈反向变化的。在  $F_s$  不变时,  $\Delta h$  愈大,  $\lambda$  也愈大,摩阻耗能也愈多。此时流速减小,冲刷强度都是与  $\lambda$  成同向变化的。须强调指出,应用上式计算时,须明确问题所基于的前提条件。另在由实测流速等资料逆推出的糙率  $n$  值已包含了  $F_s$  的影响。考虑到糙凸力学性质的影响后,上式改为

$$\lambda = \lambda(\Delta h, F_s) d(v^2/2) \approx \lambda(n, h) d(v^2/2) \quad (13)$$

据紊流理论有

$$\lambda = (2qn^2) / R^{2y} \quad (14)$$

式中:  $y$ ——巴氏公式中的指数。据观测流速(量),用上式可算得  $\lambda$  值。

定义单位时间与坡面积上降雨冲走的泥沙重量为冲刷强度  $e$ (模数),仅就裸露坡表言,它同坡表所受切力有如下关系

$$e = Z\lambda(\Delta h, F_s) (fv^2/2)^H \quad (15)$$

式中:  $Z$ ——冲刷系数,系单位切力下的冲刷强度;  $H$ ——待定幂次,应据试验结果确定。

含沙量  $d_m$  公式为

$$d_m = 3.6 \times 10^6 (e/r) \quad (16)$$

式中:  $r$ ——净雨强度(mm/h);  $e, d_m$  均用  $[m^3 \cdot s^{-1} \cdot kg]$  制单位。设输沙率近似与流量的二次方成正比,  $H \approx 1$ , 由式(12), (16)推得坡地冲刷公式

$$e = Z[F_s, \theta(\_, r_s)] \lambda(\Delta h, F_s) d(v^2/2) \quad (17)$$

式中:  $\_, r_s$ ——分别是土壤的级配度、容重,它们决定了单位体积表土中可被冲移走的比例  $\theta$ 。冲刷量随  $\theta$  增大而增加,如前述,  $\lambda$  随  $F_s$  增大而增加,但  $Z$  随  $F_s$  增大而更迅速减小,故冲刷强度是随  $F_s$  增大而减小的,即  $e \propto 1/F_s^K$ ,  $K$  值应据试验定。

按紊流随机理论<sup>[2]</sup>,宽、浅渠槽公式为

$$\lambda = 2 \left\{ \bar{v} \frac{R^*}{3} + \bar{v}' \left[ 2.5 - \frac{14.1}{R^*/5} \right] \ln \left[ 1 + \frac{R^*}{5} \right] + 1.05 \left[ 1 + \frac{1}{1 + R^*/5} \right] - B^* \right\}^{-2} \quad (18)$$

其中:  $\bar{v}, \bar{v}'$ ——分别是层流、紊流态发生的概率。且有

$$\bar{v}' = 1 - \frac{1}{e} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{n!} \left( \frac{R^* K}{R^*} \right)^{2n} \right] \quad (R^* \geq R^* K) \quad (19)$$

式中:  $R^* K$ ——为临界摩阻雷诺数。由试验测定各临界  $R^*$  后,便可得出坡地流阻力规律。考虑糙度影响的修正公式是

$$\bar{v}' = 1 - \frac{1}{e} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n!}{n!} \left[ R^* K - D_0 \left( \frac{\Delta}{\Delta_0} - 1 \right) \right] / R^* \right]^{2n} \quad (20)$$

其中:  $\Delta_0, \Delta$ ——分别为实验采用的当量糙度值和待解问题的已知值,  $D = D_0(\Delta/\Delta_0 - 1)$  是对  $R^* K$  的修正量。

在充分紊流区,  $\bar{v} = 0, \bar{v}' = 1$ , 则(18)式变成

$$\lambda = 2 \left\{ (2.5 - 70.5/R^*) \ln \left[ 1 + \frac{R^*}{5} \right] + 7.05 \left[ 1 / \left( 1 + \frac{R^*}{5} \right) \right] - B^* \right\}^{-2} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } B^* = & 2.5 \ln \left[ \frac{1 + 0.2\Gamma R_b}{1 + 0.2\Upsilon R_b} \right] + 7.05 \left[ \left( \frac{0.2\Gamma R_b}{1 + 0.2\Gamma R_b} \right)^2 - \frac{0.2\Upsilon R_b}{1 + 0.2\Upsilon R_b} \right] \\ & + 2.5 \left[ \frac{0.2\Gamma R_b}{1 + 0.2\Gamma R_b} - \frac{0.2\Upsilon R_b}{1 + 0.2\Upsilon R_b} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

式中:  $\Gamma, \Upsilon$ ——水力参数。且试验表明,在各种边界糙凸下,  $\lambda$  随  $R_b$  变化的规律是相同的,故对

坡地紊流通常也可取 100 为  $R_c$  的临界值, 即当  $R_c \geq 100$  时, 坡流阻力系数为常数, 不再随  $\Delta$ ,  $R_c$  变化。此时按宽浅槽流,  $T_c = 1, U_c = 0.107$ 。另在  $R_c \geq 100$  时,  $B^* = 8.55$ , (22) 式可简化为

$$\lambda = 1/[4.06 \lg(h/\Delta) + 4.21]^2 \quad (23)$$

推求  $\lambda$  值的关键是正确定出  $\Delta$  值。对粗糙区, 经详细实验得出的满宁—张公式<sup>[2]</sup>较可靠:

$$\Delta = 6.75^6 g^3 n^6 \quad (24)$$

由  $\lambda \sim C$  关系推得

$$\lambda = 0.044(\Delta/h)^{1/3} \quad (25)$$

在有水文观测资料时, 可据实测  $i, v(h)$ ,  $J$  值用谢才公式反推得  $n$  值。否则须按坡面情况参考糙率表确定。再由 (24) 式求得  $\Delta$  值。

本法计算步骤为: 已知降雨强度, 由方程 (6), (11) 分别算得坡地平均流速  $\bar{v}$  和水深  $h$ 。代  $h, \Delta, \bar{v}$  到 (21), (22), (25) 式求得阻力系数  $\lambda$ , 再代入  $l, \bar{v}$  值于 (17) 式, 即得冲刷强度  $e$ 。

坡地流模型的参数  $S, X$  值也可据降雨、流量观测资料, 用式 (7)~(9) 之一识别得。由观测的坡地出流量 (或  $T, i$ ) 及其含沙量  $d_m$ , 按 (16) 式可算出  $e$ , 代入它和已知的  $\bar{v}, \lambda$  到 (17) 式, 便得出系数  $n$  值。

本法还可估算由于水土保持措施所能减小的冲刷量。以典型的植被工程为例: 植被化后, 按植被种类、密度的不同, 总阻力系数值将有不同的增大, 但表土阻抗所致的  $\lambda$  分量 (即裸表下的  $\lambda$  值) 可视作不变。同时, 因植被的固土抗冲作用, 粘结度  $F_s$ , 冲刷系数将减小; 另因糙率  $n$  及入渗系数  $S$  增大, 流速必减小。在下文中, 植被条件下的各有关量名的右上角均标注“'”号, 以示区别。

经识别定出参数  $n', S'$  后, 只须同样算出  $h', \bar{v}'$ , 而无须另求  $v'^*, R'^*, \lambda'$  值, 仍按 (13) 式, 算得  $f'^*$ 。再以  $n$  值或修正  $n'$  值, 用 (17) 式求得植被化下的冲刷强度  $e'$  及  $d'_m$  值。须指出, 有植被时水流切力的增量全由植被承受, 该增量被传递到土表以下的根部, 表土并不经受此冲力, 故仍应按裸表状态下的  $\lambda$  值, 计算水流对表土的切力  $f'^*$  和  $e'$ 。若用  $\lambda'$  值计算 (17) 式, 则所得  $f'^*$  是表土与植被共受的总切力, 显然将使  $e'$  值偏大。较植被化前,  $v, Z$  必减小, 而  $\lambda$  不变, 故冲刷强度必减小。可见本法能从成因上确切地反映出坡地冲刷的定量规律, 并为水保工程规划设计提供科学的依据。

## 4 本法参数识别

参数  $\lambda, Z$  无法由理论推算得, 须凭实测资料求逆方式解得。如 (17) 所示,  $e$  与  $\lambda, Z$  呈非线性关系, 由于非线性规划还不成熟, 尚无通用、严密的解法, 且计算麻烦, 目前仍以应用非线性最小二乘法为宜。最优化估计的目标函数与约束条件为

$$\min F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w(q_{i,j}) [e_{i,j}^{e^0} - e_{i,j}(\lambda, Z)]^2 = \sum_{i=1}^m e_i^2(\lambda, Z) \quad \left. \begin{array}{l} \lambda_{mi} \leq \lambda \leq \lambda_{ma} \\ Z_{mi} \leq Z \leq Z_{ma} \end{array} \right\} \quad (26)$$

式中:  $i, j$ ——坡地雨洪测次序号, 次雨洪出流观测时刻序号;  $l$ ——流量测次序号;  $e^0, e$ ——坡地冲刷强度的观测、计算值;  $w$ ——考虑  $q$  量值影响的权重因子;  $e$ ——关于  $e$  的计算误差; 下标“ $ma, mi$ ”——参数选择范围的上、下限。  $L = m \cdot n$  为总流量测次数。

待求参数满足极值条件的方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial \lambda} & \frac{\partial e_2}{\partial \lambda} & \cdots & \frac{\partial e_l}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial e_1}{\partial Z} & \frac{\partial e_2}{\partial Z} & \cdots & \frac{\partial e_l}{\partial Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_l \end{bmatrix} = 0 \quad (27)$$

利用泰勒公式,将式中各元素在初值附近展开,求得区间末的近似值,重复叠代演算,直到满足

$$\begin{bmatrix} \lambda(K+1) - \lambda(K) \\ Z(K+1) - Z(K) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (28)$$

便求得最佳  $\lambda$ ,  $Z$  值 式中  $K$  是叠代步序号,  $X$  是允许误差 如遇计算收敛有困难,可改用单纯形法,即求最小评价函数的数值方法获解

## 5 计算举例

美贝德格尔瓦什径流试验场做了人工降雨下的侵蚀测试,该坡地基岩为页岩,坡度 0.2,坡面积  $400 \text{ m}^2$ ,径流系数 0.2~0.5 其中 1 次试验的降雨强度为  $31 \text{ mm/h}$ ,  $T=0.2$  经综合分析资料,确定  $s=1.0 \text{ h}^{-1}$ ,  $X=0.35$  按 (16)~(23) 式,由实测的 2 次雨强含水量等资料识别得参数  $n=0.02$ ,  $Z=0.011 \text{ s}^{-1}$ ,除另予说明外,本例中各量单位均为  $[\text{m}^\circ \text{ s}^\circ \text{ kg}]$  制

将上述已知数据和参数值代入方程 (9) 中有

$$(0.35 \times 400) / 20 \times (3 \times 0.278 \times 10^{-6} - 0.05 \times 2.8 \times 10^{-4} \times 0.2^{1/3} \times 0.35^{1/3} \bar{q}^{1/3}) = \bar{q}$$

解得  $\bar{q}=0.514 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , 代入到 (11) 式得面均水深

$$\bar{h}=0.336 \times (0.02/0.2)^{0.316} \times (0.514 \times 10^{-4})^{0.474} = 1.54 \times 10^{-3} \text{ m}$$

据  $h$  值按 (6) 式算得面均流速

$$v=10 \times (0.02)^{-2/3} \times (1.54 \times 10^{-3} \text{ m})^{10/9} \times 0.2^{2/3} = 0.035 \text{ m/s}$$

由 (23) 式得出糙率当量高度

$$\Delta=(6.75 \times 0.02)^6 \times 9.81^3 = 5.73 \times 10^{-3} \text{ m}$$

已知  $R \approx h$ , 按 (24) 式求得摩阻流速

$$v_* = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.2 \times 1.54 \times 10^{-3} \text{ m}}{5.73 \times 10^{-3} \text{ m}} = 5.5 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

据此算得各雷诺数

$$R_* = (5.5 \times 10^{-2} \text{ m/s} / 8 \times 1.54 \times 10^{-3} \text{ m}) / (0.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) = 84.70$$

$$R_* = (5.5 \times 10^{-2} \text{ m/s} / 8 \times 5.73 \times 10^{-3} \text{ m}) / (0.01 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}) = 316.30$$

据  $R_*$  查万声流水槽试验  $\bar{v} \sim \lg R_*$  关系图<sup>[2]</sup> 得,  $\bar{v}=0.8$ , 且已知渠槽临界  $R_{*k}=49$ , 而在坡地相对糙度显较渠槽为大,  $R_{*k}$  更小, 同时实际  $\bar{v} \rightarrow 1.0$ , 并有  $R_{*k} \gg 100$ , 可判断流动必属于紊流粗糙区, 故可应用 (22) 式算得阻力系数:

$$\lambda = 0.044 [(5.73 \times 10^{-3}) / (1.54 \times 10^{-3})]^{1/3} = 0.068$$

代  $Z, \lambda, v$  等值于 (16) 式得冲刷模数

$$e = 0.011 \text{ s}^{-1} \times 0.068 \times 102 \text{ kg s}^2 \text{ m}^{-4} \times 1 / 2 \times 0.035^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = 0.467 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

代  $i, e, T$  值于 (25) 式, 便求得该雨强下的坡流含沙量:

$$d_m = (3.6 \times 10^6 \times 0.467 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2 \text{ s}) / (0.2 \times 31 \text{ mm/h}) = 27.1 \text{ kg/m}^3$$

而实测含沙量是  $29.3 \text{ kg/m}^3$ , 可见此计算方法计算精度良好。

## 参 考 文 献

- 1 W. W 埃米特. 坡面流. 山坡水文学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- 2 窦国仁. 紊流力学. 北京: 人民教育出版社, 1981
- 3 柯比克 M J. 泥沙输送推论. 山坡水文学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- 4 华东水利学院. 水文预报. 北京: 中国工业出版社, 1962