

侵蚀产沙系统模型概述

柳丽英

范荣生

(水利部西北水利科学研究所·陕西杨陵·712100) (西安理工大学水利水电学院)

摘要 根据目前国内外侵蚀产沙模型的研究现状,系统地阐述了流域从降雨到地表径流、沟间地产沙输移、细沟侵蚀产沙输移和泥沙的演进计算过程。

关键词: 侵蚀产沙 地表径流 沟间地产沙 细沟侵蚀 泥沙演进

An Introduction to Systematic Models of Erosion and Sediment

Liu Liying

(Northwestern Institute of Hydraulics, Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, P.R.C)

Fan Rongsheng

(College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Science and Engineering)

Abstract Based on the study of erosion and sediment at present, the calculating processes of rainfall- surface runoff- delivery rate of sediment from interrill- rill erosion rate- sedimentation routing are expounded systematically.

Keywords: erosion sediment; surface runoff; sediment from interrill; rill erosion; sedimentation routing

土壤侵蚀和流域产沙是地球表面普遍存在的自然现象,是侵蚀循环的主要过程之一。地表物质在外营力作用下发生的分散和移动称为土壤侵蚀,被侵蚀的物质汇集到河网中,沿河槽向下游运动,一部分沿程淤积,最终到达流域出口的称为流域产沙。侵蚀与产沙是一个极其复杂的物理过程,它包括泥沙的侵蚀输移和淤积三个主要子过程,在每一个子过程中,又有许多更次级的基本过程;侵蚀与产沙又是一个极其复杂的系统,它受到许多自然因素的制约(如气候、地形、地质、土壤、植被等),同时又受到人类活动的干扰,各个因素之间存在着错综复杂的相互作用。侵蚀产沙和泥沙输移的研究,目前通常以流域为单元,把流域视作一个具有能量和物质输入、转换和输出的开放系统,可分以下几步进行:地表径流演算、侵蚀产沙模型和坡面泥沙演进计算。

1 地表径流演算

假定摩阻比降 S_f 等于地面坡度 S , 可得一维地表径流的运动波方程^[1], 平面上径流的运

动波方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i - f \quad (1)$$

$$q = kh^{3/2} \quad (2)$$

式中: h —— 当地水深(m); t —— 时间(s); q —— 单宽流量(m^2/s); x —— 平面向下的距离(m); i —— 降雨强度(m/s); f —— 入渗率(m/s); k —— 深度 ~ 流量系数($\text{m}^{1/2}/\text{s}$)。

从方程(1)和(2)的解可得到径流过程中所有时刻和平面上所有点的 $q(k, t)$ 和 $h(x, t)$ 。方程(2)式中的水位 ~ 流量系数 k 可用 $k = CS^{1/2}$ 或 $k = (8kgs/f)^{1/2}$ 求得, 其中:

C —— 谢才阻力系数, 以 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ 计; f —— 达西魏斯巴赫摩阻系数(无量纲), f 与 c 关系为 $f = 8g/c^2$, 其中 g 为重力加速度。

总的水力阻力可用各摩阻系数相加的关系表达为:

$$f_{\text{tot}} = f_{\text{soil}} + f_{\text{rr}} + f_{\text{cov}} \quad (3)$$

式中: f_{tot} —— 总摩阻系数; f_{soil} —— 均匀表面上裸土的特征摩阻系数; f_{rr} —— 地表径流表面微地貌的不规则性引起的摩阻系数; f_{cov} —— 土壤表面的覆盖层引起的摩阻系数。

平面上地表径流的剪应力可计算为:

$$\tau = r h s \quad (4)$$

式中: τ —— 剪应力(N/m^2); h —— 平均水深(m); s —— 坡度; r —— 水的容重(N/m^3)。集中水流的剪应力可计算为:

$$\tau = r R s \quad (5)$$

式中: R —— 水力半径(m)。

2 流域侵蚀产沙模型

流域侵蚀产沙主要是坡面侵蚀产沙, 即面蚀和细沟侵蚀产沙两部分。

坡地动态侵蚀模型的连续方程为:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial(cy)}{\partial t} = D_r + D_l \quad (6)$$

式中: q_s —— 单宽输沙率($\text{g}/\text{m} \cdot \text{t}$); ρ_s —— 泥沙颗粒密度; c —— 水流泥沙浓度; y —— 径流深; t —— 时间; D_r —— 细沟侵蚀率($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{t}$); D_l —— 沟间泥沙输移率($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{t}$)

首先将地表径流划分为沟间侵蚀的宽阔片流和细沟侵蚀的集中水流。下面的问题就是求解沟间泥沙输移率 D_l 和细沟侵蚀率 D_r 。

2.1 沟间泥沙输移率的计算

当雨滴溅击裸土时, 强烈的水力作用力导致土粒分离, 这些泥沙颗粒随之通过两种机制被输移, 一是溅击机制; 二是被沟间地范围内薄的片流输移的机制。因而沟间面上既有土壤颗粒的剥蚀又有输移, 剥蚀主要是雨滴击溅引起的, 剥蚀的颗粒在薄层片流和雨滴击溅共同作用下输移到细沟里。因而在计算沟间地泥沙输移率时, 首先将侵蚀分离能力和水流输移泥沙的能力计算出来, 然后取其中较小者为沟间泥沙输移率^[16]。

沟间侵蚀分离能力可用下式计算:

$$D_{L1} = 0.0138K_l \cdot i^2 \quad (7)$$

式中: D_{L1} —— 沟间侵蚀分离能力($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$); K_l —— 土壤侵蚀力因子($\text{kg} \cdot \text{h}/\text{N} \cdot \text{m}^2$); i —— 降雨强度(mm/h)。若考虑坡度因子及植被等因素的影响。上式为:

$$D_{L1} = 0.0138K_L \cdot i_{\text{eff}}^2 [0.96(\sin\theta)^{0.79} + 0.56] C_i \quad (8)$$

$$\text{且 } i_{\text{eff}}^2 = i^2 [a + (1-a)(m_{ca}V_{ca}^2/m_pV_p^2)(i_{can}/i)]$$

式中: $\sin\theta$ ——坡角正弦; a ——无灌木覆盖的比例因子; m_{ca}/m_p ——从灌木上落下的雨滴与天然雨滴重量比; V_{ca}/V_p ——从灌木上落下的雨滴与天然雨滴的速度之比; i_{can}/i ——降雨时段内从灌木上落下的与总降雨量之比; i_{eff}^2 ——有效雨强; i ——冠木林上方雨强。

$$\text{又: } C_i = \xi \cdot \exp\{-0.21(y_c/y_b - 1)\}^{1.18} \quad (9)$$

式中: ξ ——裸露土与总面积之比; y_c/y_b ——有植被与没有植被的水深之比。比率 y_c/y_b 可表示为: $y_c/y_b = q_c \cdot V_b / (q_b \cdot V_c)$ 其中: q_c, q_b ——分别为有植被和无植被表面的流量; V_c, V_b ——有植被和无植被表面和流速。

沟间水流输移泥沙的能力可用典型的泥沙输移方程计算:

$$T_d = A_t(\tau - \tau_c)^{1.5} \quad (10)$$

式中: T_d ——沟间地水流输移能力(g/mt); τ_c ——临界剪应力; 系数 A_t 和 τ_c 与泥沙粒径和密度有关。水流剪应力 τ 可用下式求得: $\tau = \gamma y_b^5 [y_b/y_p] a i_{\text{eff}}^2 C_i$

式中: a ——需要估算的系数; γ ——薄层流水深; y_b/y_p ——光滑表面水深与洼地或坎壅水深度之比; 而 $C_i = \exp\{-0.21[y_b/y_p] - 1\}^{1.18}$ 也可用上节提到的地表径流的剪应力公式(4)计算 τ

在正常情况下, 比较计算的 T_d 与 D_{L1} , 选择较小的为沟间泥沙输移率 D_L 。如果用方程(10)计算的 T_d 与实际不符, 可把方程(8)计算的沟间侵蚀分离能力乘一个糙率因子作为泥沙输移能力。

沟间分离的泥沙粒径大小是雨强的函数, 同时随植被的增加而减小, 从沟间分离的泥沙经水流输移进入细沟。

2.2 细沟侵蚀率的计算

若沟间泥沙输入量小于细沟水流输沙能力, 通常会发生细沟侵蚀, 反之, 发生淤积。由此可见, 细沟侵蚀率与沟间泥沙输入量、细沟水流输沙能力有关。要计算细沟侵蚀率, 首先要计算在水流的作用下细沟可能发生的侵蚀分离能力, 再求出细沟水流输沙能力, 然后根据沟间泥沙输入量的大小, 确定细沟侵蚀率, 可用下式表示:

$$\text{细沟侵蚀率 } D_r = \text{细沟水流输沙能力 } T_c - \text{沟间泥沙输入量 } D_L。$$

一般来说, 细沟侵蚀分离能力可用两种方法求得; 一是用单一细沟侵蚀描述整个地区的细沟侵蚀, 一是直接求取总细沟侵蚀。

2.2.1 单一细沟侵蚀计算 设单一细沟侵蚀是水流水力学函数, 特别是剪应力函数; 当流量和坡度增大时, 由于剪应力增大, 细沟侵蚀的数量就会增大^[6]。设水力半径为水流过水面积的函数, 即: $R = 0.70A^{0.64}$ 于是可以用前面给出的公式计算每一流量相应的剪应力, 对无植被细沟有:

$$D_{rc} = 2.76(\bar{\tau} - 2.78)^{1.17} \quad (11)$$

$$\text{或 } D_{rc} = 11.4(\bar{\tau} - 4.78)^{1.05} \quad (12)$$

对有植被细沟:

$$D_{rc} = 2.34(\bar{\tau} - 4.16)^{0.93} \quad (13)$$

其中: D_{rc} ——单位沟槽面积上细沟侵蚀分离能力($g/m^2 \cdot s$)。

2.2.2 总细沟侵蚀 假定在坡地横断面上, 细沟侵蚀和水流均匀分布, 则细沟侵蚀方程为:

$$D_{rc} = a(\tau - \tau_c)^b \quad (14)$$

式中: τ ——假定为宽浅层流的剪应力; τ_c ——临界剪应力。因 τ_c 特别难定,因而我们采用下式:

$$D_{rc} = 83.7K_r\tau^{1.5}C_r \quad (15)$$

式中: τ ——假定宽阔片流的平均剪应力; K_r ——土壤侵蚀力因子($\text{kg}\cdot\text{h}/\text{N}\cdot\text{m}^2$); C_r ——植被管理因子。设水流为平衡水流,则坡长为 x 的总细沟侵蚀方程为:

$$q_{src} = aY^{A.5}(f/8g)^{0.5}S \cdot \sigma \cdot x^2K_rC_r/2 \quad (16)$$

式中: q_{src} ——当细沟侵蚀以分离能力发生时坡长 x 的输沙量; f ——Durey-Weisbach 比例因子; S ——坡角正弦; σ ——超渗雨强; g ——重力加速度; Y ——水的比重; K_r ——土壤侵蚀力,采用 USLE 中的 K ; C_r ——为考虑原来植被影响的 USLE 中的土壤流失率,对于冠木林,有:

$$C_r = 44.5 + 39.2 \{1 - \exp(-0.074i\alpha^2)\} \quad (17)$$

由于细沟侵蚀与它的表层因子关系非常复杂,因而对方程(15)进行简化为:

$$D_{rc} = C_B q S K C_{sr} \quad (18)$$

式中: C_B ——校正系数; q ——径流率; S ——坡角正弦; K ——USLE 中的土壤流失率。

2.2.3 细沟水流输沙能力 用沟间地侵蚀区的泥沙分布作为细沟侵蚀泥沙分布;假定细沟中为均匀沙,则可用下式计算地表径流输沙能力:

$$T_c = a \cdot s^{5/3} \cdot q^{5/3} \quad (19)$$

式中: T_c ——水流输沙能力; q ——单宽流量; s ——坡角正弦。

为了避免模型的偏差,可用 Yalin(1963)方程作为参考,其方程如下:

$$P = (W_s/S_g\rho_w dV^*) = 0.635 \{1 - (1/\sigma)\ln(1+\sigma)\} \quad (20)$$

$$\sigma = A\delta \quad (21)$$

$$\delta = (y/y_{cr}) - 1 \quad (\text{当 } y < y_{cr} \text{ 时, } \delta = 0) \quad (22)$$

$$A = 2.45S_g^{0.4} \cdot y_{cr}^{0.5} \quad (23)$$

$$y = V^{*2}/\{S_g - 1\}g \cdot d \quad (24)$$

$$V^* = (gR_f^3)^{1/2} = (\tau_{cs}/P_w)^{1/2} \quad (25)$$

式中: P ——无因次泥沙输移能力; W_s ——泥沙输移能力($\text{g}/\text{m}\cdot\text{s}$); S_g ——颗粒比重; ρ_w ——水的密度; d ——粒径; V^* ——切变速度; y_{cr} ——Shields Diagram 中的纵坐标; g ——重力加速度; R_f ——水力半径; S ——能量梯度坡度; τ_{cs} ——作用于土壤表面的剪应力; δ ——超渗雨强。

对均匀沙,水流输沙能力 T_c 等于 W_s ; 对非均匀沙,将 Yalin 方程改进,同样适用。Yalin (1963)认为,泥沙输移率等于单位面积上输移的颗粒数乘以每级颗粒的质量和速度。Foster and Meyer 认为,混合物可以降低输移中某种粒子的数量,而不会降低速度。Yalin 假定,输移中的颗粒与 δ 成正比,因而,对混合物来说,粒子级 i 的粒子数与 δ 成正比。混合物中的每一粒级的 δ 都可以计算,且总量为: $T = \sum_{i=1}^n \delta_i$ 。粒子级 i 的被输移的粒子数量 $(Ne)_i$ 为: $(Ne)_i = N_i(\delta_i/T)$; 其中: N_i ——在 δ 下粒子级 i 的输移数。因方程(20)中的 P 与 N_i 成正比,所以 $(Pe)_i$ 为: $(Pe)_i = P_i(\delta_i/T)$, 其中: $(Pe)_i$ ——混合物中类型 i 的有效 P ; P_i ——粒子级 i 的均匀沙计算 P 。混合物中粒子级 i 的输移能力 W_{si} 为:

$$W_{si} = (Pe)_i S_{gi} \rho_w d_i V^* \quad (26)$$

这就是说, 各个粒子级的有效输移能力要么都比 W_{si} 大, 要么都小于 W_{si} , 这时可直接定 $W_{si} = T_{ci}$, 当混合物中的某些粒子级的可获量大于 W_{si} 时, 输移能力增大, 可用下面的步骤进行再分配。

(1) 当 $W_{si} > q_{si}$ 时, (q_{si} ——粒子级 i 的输移率): $P_{ireg} = q_{si} / [(S_{gi}) \rho_w d_i V^*]$

这时粒子级 i 的输移能力为: $T_{ci} = q_{si}$

(2) 若 $W_{si} > q_{si}$, 则累积量为: $SPT = \sum_{i=1}^n (P_{ireg} / P_i)$

(3) 当 $W_{si} > q_{si}$ 的粒子级 i 与总体的比例为: $EXC = 1 - SPT$

(4) 若 $W_{si} < q_{si}$, δ_i 的累积量为: $SDLT = \sum_{i=1}^n \delta_i$

(5) 对 $W_{si} < q_{si}$ 的颗粒类型, 其超过部分的颗粒按照原来的 δ 颗粒分布进行分配, 即:

$$T_{ci} = (\delta_i / SDLT) (EXC) (P_i) (S_{gi}) \rho_w d_i V^* \quad (27)$$

(6) 重复(1) ~ (5) 步, 直到所有的 $T_{ci} \leq q_{si}$, 或 $T_{ci} = q_{si}$ 。若前者发生, 说明 T_{ci} 合适, 反之, 可能有一种粒子级超过输移能力, 而超过的量将分布于所有的颗粒中, 即:

$$SMUS = \sum_{i=1}^n (P_{ireg} / P_i), T_{ci} = (1.0 / SMUS) q_{si}$$

(7) 计算细沟的总输移: $T_c = \sum_{i=1}^n T_i$

对于细沟的侵蚀计算, 是用细沟的 T_c 减去沟间输移 D_L 之差, 即设 $D_T = T_c - D_L$ 。

若 $D_{rc} > D_T$, 则细沟间分离 D_r 为: $D_r = T_c - D_L = D_T$

若 $D_{rc} < D_T$, 则细沟分离 D_r 为: $D_r = D_{rc}$

若计算的细沟 $T_c < D_L$, 则发生淤积。

2.3 流域产沙计算

前面提到动态坡地侵蚀模型的连续方程为

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \rho_s \frac{\partial (cy)}{\partial t} = D_r + D_L$$

若假定为准平衡条件, 则坡地侵蚀的泥沙连续方程为:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} = D_r + D_L \quad (28)$$

则断面含沙量为:

$$q_s = \int_{x_1}^{x_2} (D_r + D_L) dx + q_{sx1} \quad (29)$$

在实际中降雨强度是不稳定的, 所以要采用动态型, 可用有限差分格式进行数值解。因 $q_s = \rho_s \cdot c \cdot q$, 且 $q = v \cdot y$, 则式(6) 可以改写为:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} \cdot \frac{\partial (q_s/v)}{\partial t} = D_r + D_L \quad (30)$$

最后求出单元出口输沙率过程。

3 泥沙的演进

被侵蚀的土壤颗粒为水流所挟带, 经由坡面、沟道、支流、干流汇集到流域出口断面, 构成流域的产沙量, 但并不是全部侵蚀的土壤颗粒都能到达出口断面, 在汇集过程中, 部分甚至大部分土壤颗粒可能沉积在坡脚、沟谷、河槽、滩地或湖泊水库中, 从而使到达出口断面的产沙量小于流域的侵蚀量。当根据流域总侵蚀量来估算流域出口断面的产沙量时, 必须知道泥沙在河网中的输移情况及淤积损失。

泥沙汇集过程是泥沙随水流的运动过程, 如果不考虑泥沙的沿程冲淤, 与水流类似地有泥

沙平衡关系:

$$\frac{dw_s}{dt} = I_s - O_s \quad (31)$$

河道中运动着的泥沙蓄泄关系为:

$$W_s = K_s [X_s \cdot I_s + (1 - X_s) \cdot O_s] \quad (32)$$

式中: W_s ——随水流运动的泥沙总量; I_s, O_s ——泥沙的输入和输出速率; K_s, X_s ——泥沙运移时间和反映泥沙波量坦化程度的权重系数。

泥沙随水流的运动中, 随着流速流量的增大, 水流的挟沙能力增大到大于实际含沙量时, 导致沿程的冲刷而使泥沙增加, 随着流速流量的减小, 水流的挟沙能力也相应减小, 沿程产生淤积。考虑泥沙的冲淤特点⁶¹, 泥沙的平衡关系变为:

$$\frac{dw_s}{dt} = I_s - O_s + q \quad (33)$$

相应的蓄泄关系为:

$$W_s = K_s [X_s \cdot I_s + (1 - X_s) O_s + \beta \cdot q / 2] \quad (34)$$

所以河道汇沙基本方程为⁶¹:

$$\begin{cases} \frac{dw_s}{dt} = I_s - O_s + q \\ W_s = K_s [X_s \cdot I_s + (1 - X_s) O_s] \end{cases} \quad (35)$$

河道中的冲淤与水力条件和泥沙条件密切相关。采用如下的挟沙能力计算公式:

$$C^* = K \left(\frac{v^3}{gRv_s} \right)^m \quad (36)$$

式中: C^* ——挟带能力; v ——断面平均流速; R ——水力半径; v_s ——泥沙平均沉降速度; $k \cdot m$ ——常系数, 挟沙能力是介于冲与淤两者之间的相对平衡状态的断面含沙量, 如果上游的来水含沙量等于断面挟沙能力, 断面上既不发生冲刷也不发生淤积; 如果上游来水的含沙量大于或小于断面挟沙能力, 断面上就发生淤积或冲刷。实际含沙量与挟沙能力相差越大, 断面上发生的冲淤量也越大。因此, 采用下式估算冲淤速率:

$$q = \alpha(CI^* - CI)I + (1 - \alpha)(C^* - C)Q \quad (37)$$

式中: I, Q ——河段的入、出流流量; CI, C ——河段的入、出水流含沙量; CI^*, C^* ——入、出流断面的挟沙能力; α ——常系数。

参 考 文 献

- 1 (美)Lone L J, Schertz D L, Alberts E E, Laflen J M, Lopes V L. 开发改进的侵蚀预报方法以代替 USLE 美国国家计划。Proceeding of the Porto Alegre Symposium, 1988. 12
- 2 Foster G R, Meyer L D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. ARS- S- 40, USDA- Agricultural Research Service, 1975, 190- 207.
- 3 Foster G R, Meyer L D, Onstand C A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. TRANSACTIONS of the ASAE. 1976, 20(4): 683 ~ 687.
- 4 Meyer L D, Foster G R, Nikolov S. Effect of flow rate and canopy on rill erosion. TRANSACTIONS of the ASAE. 1975, 18(5): 905 ~ 911
- 5 包为民. 概念性汇沙模型初探. 河海大学学报. 1990, 18(6)