

三峡库区中小流域产沙数学模型

张继生,* 王平义, 刘亚辉

(重庆交通学院 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 本文旨在探讨三峡库区中小流域的产沙数学模型, 分析研究库区主要环境因子对流域产沙的影响, 推导出流域产沙量的计算, 与产流计算公式一起, 构成了概念清楚、过程明确、结构完整的流域产沙模型. 将该模型用于三峡库区部分流域的产沙验证计算, 结果令人满意.

关键词: 三峡; 流域泥沙; 水流侵蚀; 模型

中图分类号: TV213. 4; X3 文献标识码: A 文章编号: 1001-716X(2004)04-0117-04

三峡工程的泥沙问题, 关系到水库使用寿命、库尾航道整治和下游河道冲刷等诸多方面, 而流域产沙量计算则是研究上述问题的基础^[1]. 三峡坝址以上流域面积约 100 万 km², 水土流失严重, 而目前尚缺乏三峡库区中小流域产沙预报数学模型系统, 所以, 在分析库区中小流域的下垫面及水文气象条件的基础上, 通过分水源以解决中小尺度流域的产沙变化问题; 通过对中小流域的分区以解决侵蚀产沙的垂直分带问题, 在产流、产沙物理成因过程的基础上, 从而建立适用于三峡库区中小流域产沙预报的数学模型.

1 流域划分及概化

三峡库区每条支流流域都是一个完整、独立的自然侵蚀、输移、产沙系统, 也是侵蚀地貌发育的基本单元. 因此, 可将库区流域按自然水系将具有水文测站的各支流进行划分; 根据干流布设的控制站、控制站的设立年限以及流域上雨量站的分布情况, 将其面积划分为若干区间单元. 而每个单元流域可概化成由不同坡度的坡和沟组成, 或近似概化为一个坡度组成^[2]. 这样就可以根据各个小流域的具体情况产生沙量计算.

2 数学模型

2.1 产流模型

2.1.1 超渗坡面径流计算^[3]

三峡库区的自记雨量资料少, 且系列很短, 很难适应大范围长系列计算的要求, 况且人为区分次洪

的界限所引起的误差是不可忽视的. 所以, 计算时段采用月系列是比较合适的, 既能应用现有的水文资料, 又能满足中小流域产流的计算精度.

通过对流域水资源的分析, 发现在天然状况下的中小流域洪水径流中, 地下径流的含量在 10% 左右, 且随流域尺度的增大有增加的趋势. 但因地下径流对侵蚀产沙影响极小, 可以忽略, 因此, 在产沙计算中有必要加以区别剔除. 为此, 本模型采用超渗—蓄满混合模式计算产流. 主要计算公式如下:

$$\alpha_{ss} = (1 - F_c / P_{\max}) (1 - k_w (W_m - W) / W_m) \cdot P / P_{\max} \quad (1)$$

$$F_c = (1 - \alpha_{\max}) P_{\max} \quad (2)$$

$$R_s = \alpha_{ss} P \quad (3)$$

$$q_w = R_s / \Delta t \quad (4)$$

式中: P ——时段降雨量; P_{\max} ——实测时段最大降雨量; W_m ——土壤最大含水量; W ——实际土壤含水量; α_{\max} ——饱和径流系数; α_s ——变径流系数; R_s ——时段产流量; q_w ——时段径流率; K_w ——常数.

2.1.2 河流汇流

单元流域出流在干沟中的运动, 用水文预报中马斯京根法连续演算. 单一河段的演算式为

$$Q_j^i = C_0 Q_{j-1}^i + C_1 Q_{j-1}^{i-1} + C_2 Q_j^{i-1} \quad (5)$$

式中: Q_{j-1}^{i-1} , Q_{j-1}^i ——上断面上、下时刻的流量; Q_j^{i-1} , Q_j^i ——下断面上、下时刻的流量; C_0 , C_1 , C_2 ——与

* 收稿日期: 2003-10-25

基金项目: 国务院三峡办公室资助“春晖计划”科研项目(SX[2000]-004)

作者简介: 张继生(1979-), 男, 福建泉州人, 硕士生, 从事水资源与环境工程研究.

河道水力特性有关的系数,满足 $C_0 + C_1 + C_2 = 1$. 计算时,首先确定河段的水力学特性参数,求出每段的 C_0 、 C_1 、 C_2 值,然后进行分段连续演算.各单元演算到总出口断面后叠加,便得全流域流量过程.

2.2 产沙模型

2.2.1 坡面侵蚀力

水流在流动过程中,单位床面上所产生的切应力 τ_0 可表示为:

$$\tau_0 = \gamma h J \quad (6)$$

式中: γ —— 水体密度; h —— 水深; J —— 比降.

对于坡面来说,这种切应力的一部分将作用于组成径流床面上的土壤颗粒上,并促使其运动.若土壤颗粒在斜坡上的起动切应力为 τ_c ,忽略颗粒间的粘结力作用,则土壤颗粒所受的有效切应力 $\tau = \tau_0 - \tau_c$,促使泥沙向前运动的力就是 τ ,有式

$$\tau_c = f(\gamma_s - \gamma) d \cos \alpha - (\gamma_s - \gamma) d \sin \alpha \quad (7)$$

式中: γ_s —— 泥沙松散密度; f —— 摩擦系数; d —— 泥沙粒径; α —— 坡面坡度.

假定径流侵蚀力 F_e 与泥沙颗粒所受的有效切应力 τ 存在线性关系,考虑 τ_0 与作用面积有关,而 τ_c 由沙粒重力引起,则 F_e 表示为:

$$F_e = K d^2 (a_1 \tau_0 - a_2 \tau_c) \quad (8)$$

式中: K —— 作用系数; a_1 —— 土壤颗粒面积系数; a_2 —— 体积系数.若将泥沙颗粒看成椭球体,取其三轴与同体积球体直径之比分别为 $4/3$ 、 $3/3$ 、 $3/2$,则 $a_1 = 2\pi/9$ 、 $a_2 = \pi/6$.将式(6)、(7)代入式(8),并令 $C' = K\pi$,整理后得

$$F_e = C' [2/9 \cdot \gamma h d^2 \operatorname{tg} \alpha - 1/6 \cdot f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha - 1/6 \cdot (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha] \quad (9)$$

式中: $\operatorname{tg} \alpha = J$. 设单位流程上的单宽流量即径流率为 q_w ,则坡长 x 处的单宽流量 q 可表示为 $q = q_w x$,由于 $q = hV$, h 为水深, V 为流速,则 $q_w x = hV$.将曼宁公式 $V = 1/n \cdot h^{2/3} J^{1/2}$ 代入,有 $q_w x = 1/n \cdot h^{5/3} J^{1/2}$,整理得

$$h = (q_w x n)^{3/5} \operatorname{tg}^{-0.3} \alpha \quad (10)$$

式中: n —— 曼宁糙率系数.

将式(10)代入式(9),可得坡面径流侵蚀力公式为:

$$F_e = C' [2/9 \cdot \gamma d^2 (q_w x n)^{3/5} \operatorname{tg}^{0.7} \alpha - 1/6 \cdot f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha + 1/6 \cdot (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha] \quad (11)$$

2.2.2 坡面的土壤侵蚀公式

对于三峡库区比较复杂的支流单元流域地形地貌,从分水线到沟底,可以分为若干个侵蚀带,分段积分求得坡面侵蚀产沙量(图1).假定降雨、入渗、

土壤特性沿坡向均无变化,自分水岭 o 点开始,顺坡由于降雨的补给沿程流量逐渐增大,坡顶 o 点至沟边线 a 点,即 $o-a$ 段为 I 区,该段坡度相对较小,径流量也较小,但由于雨滴溅蚀作用,很容易使表土形成松散沉积物,为径流所挟带,故仍有一定的侵蚀产沙,沟边线 a 点至沟边线 b 点即 $a-b$ 段为 II 区,该段因坡度较陡,径流侵蚀力较大,所以侵蚀产沙也大; $b-c$ 段为 III 区,视不同的沟槽形态、地质条件有不同的冲淤变化.

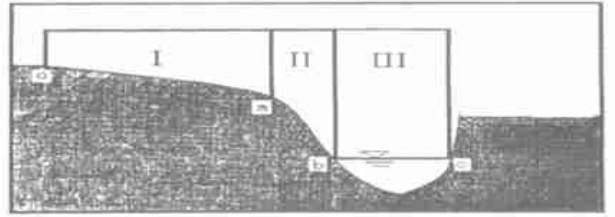


图 1 坡面的分区

设 I 区、II 区的坡长分别为 L_1 、 L_2 , I 区的径流率、糙率和平均坡度分别为 q_{ws} 、 n_s 和 α_s , II 区的径流率、糙率和平均坡度分别为 q_{wr} 、 n_r 和 α_r ,则整块坡面上的土壤侵蚀量应为

$$E_r = E_{sT} + E_{rT} \quad (12)$$

式中: E_{sT} 、 E_{rT} 分别为梁峁坡、沟谷坡上总的土壤侵蚀量.其中

$$E_{sT} = \int_0^{L_1} e_s dx = \int_0^{L_1} C' [2/9 \cdot \gamma d^2 (q_{ws} x n_s)^{3/5} \operatorname{tg}^{0.7} \alpha_s - 1/6 \cdot f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_s + 1/6 \cdot (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_s] dx$$

$$\text{积分并令 } A'_s = C/6 \cdot \gamma d^2 (q_{ws} x n_s)^{3/5} \operatorname{tg}^{0.7} \alpha_s$$

$$B'_s = - C/6 \cdot f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_s + C/6 \cdot (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_s$$

$$\text{则 } E_{sT} = 5/6 \cdot A'_s L_1^{8/5} + B'_s L_1$$

$$E_{rT} = \int_{L_1}^{L_1+L_2} e_r dx = \int_{L_1}^{L_1+L_2} C' [2/9 \cdot \gamma d^2 (q_{wr} x n_r)^{3/5} \operatorname{tg}^{0.7} \alpha_r - 1/6 \cdot f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_r + 1/6 \cdot (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_r] dx$$

$$\text{同样积分上式,并令 } A_r = \gamma d^2 (q_{wr} x n_r)^{3/5} \operatorname{tg}^{0.7} \alpha_r$$

$$B'_r = - C/6 \cdot f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_r + C/6 \cdot (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_r$$

$$\text{所以 } E_r = E_{sT} + E_{rT} = 5/6 \cdot (A'_s - A'_r) L_1^{8/5} + 5/6 \cdot A'_r (L_1 + L_2)^{8/5} + B'_s L_1 + B'_r L_2 \quad (13)$$

式(13)可用来计算具有不同坡度组成的坡面上的土壤侵蚀量.

如果流域是单一坡面,即 $\alpha_s = \alpha_r$, $A'_s = A'_r = A$, $B'_s = B'_r = B$,则式(13)可简化为

$$E_T = 5/6 \cdot A(L_1 + L_2)^{8/5} + B(L_1 + L_2)$$

将式(13)中各系数的公因子 C 提取出来, 可改写为

$$E_T = C[5/6 \cdot (A_s - A_r)L_1^{8/5} + 5/6 \cdot A_r(L_1 + L_2)^{8/5} + BL_1 + BL_2]$$
 (14)

对式(14)中参数 C 的稳定性进行分析表明, C 与坡面径流总量具有良好的线性关系, 可表示为

$$C = C'_{DR}W_P = C'_{DR}R_sAF$$
 (15)

式中: W_p ——坡面径流体积总量; C'_{DR} ——系数; F ——坡面面积。

2.2.3 流域产沙量计算

在坡面土壤侵蚀物质为水流挟带输送过程中, 存在淤积与再输移现象。同时, 假定流域的左右坡面对称, 则流域产沙量 W_T 可表示为

$$W_T = D_r \cdot 2E_T$$
 (16)

式中: D_r ——泥沙输移比。

将式(14)、式(15)代入式(16), 并使 $q_{ws} = q_{wr} = q_w$, 重新整理后得

$$W_T = 5/3 \cdot C'_{DR}R_sD_rF[(A_s - A_r)L_1^{8/5} + A_r(L_1 + L_2)^{8/5} + 6/5 \cdot B_sL_1 + 6/5 \cdot B_rL_2]$$
 (17)

由于泥沙输移比 D_r 的确定带由一定的经验性质, 使得侵蚀泥沙的沉积与输移过程存在某种不确定性。为了便于分析计算, 将 D_r 合并到系数 C'_{DR} 中, 并令 $C_{DR} = C'_{DR}D_r$, 则上式变为

$$W_T = 5/3 \cdot C_{DR}R_sF[(A_s - A_r)L_1^{8/5} + A_r(L_1 + L_2)^{8/5} + 6/5 \cdot B_sL_1 + 6/5 \cdot B_rL_2]$$
 (18)

其中 $A_s = \sqrt[3]{d^2(q_w n_s)^{3/5} \lg^{0.7} \alpha_s}$,

$$B_s = -f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_s + (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_s$$
$$A_r = \sqrt[3]{d^2(q_w n_r)^{3/5} \lg^{0.7} \alpha_r}$$
$$B_r = -f(\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_r + (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_r$$

式中: C'_{DR} ——系数, 主要反映土壤特性对流域侵蚀产沙的影响, 需要实测资料率定; R_s ——地面径流深; F ——流域面积; q_w ——径流率; $n_s, n_r, \alpha_s, \alpha_r, L_1, L_2$ ——梁峁坡与沟谷坡糙率、坡度、坡长。由式(18)知, 流域产沙量与降雨量、坡度、糙率(地表覆盖或处理情况)、泥沙级配、坡长和坡度等因素有关, 反映了气象、下垫面条件、土壤特性等因素对产流产沙的综合作用。式(18)中各物理量的单位是: d , mm; γ_s, γ , t/m³; L_1, L_2 , m; q_w , mm/s; R_s , mm; F , km²; W_T , t。

将式(18)应用于流域产沙计算, 与式(1)、式(2)、式(3)、式(4)和式(5)一起构成了完整的流域产沙计算模型。

3 模型应用验证

本模型应用验证所需要的基本资料主要有降雨、径流、泥沙的年月统计值, 泥沙级配资料和该流域的地形地貌特征值。选取木洞河、干井河、汝溪河、长滩河、大宁河支流流域、开县小江等中小流域对所建立的库区流域产沙模型进行应用验证, 各流域主要计算资料如下表所示^[4]。其中, 图上量取值可根据中科院《长江三峡生态与环境地图集》中的“三峡库区不同土地利用土壤侵蚀等级图”计算得出。计算结果表明: 计算值与图上量取值比较一致(表1)。

表 1 计算参数及模型计算结果

| 流域名称 | A_{ss} | C_{dr} | n | P (mm) | F (km ²) | L (m) | r_s | 坡度 | W_t (t) | 计算 W_t/F | 图上量取 W_t/F |
|------|----------|----------|------|----------|------------------------|---------|-------|----|-----------|------------|--------------|
| 木洞河 | 0.8 | 1.6 | 0.08 | 1050.00 | 856 | 81000 | 2.68 | 35 | 4385632.6 | 5123.403 | 5107.1 |
| 干井河 | 0.7 | 1.4 | 0.07 | 1150.00 | 928 | 65000 | 2.68 | 40 | 2892364.4 | 3116.772 | 3250 |
| 汝溪河 | 0.6 | 1.5 | 0.06 | 1200.00 | 743 | 64000 | 2.67 | 35 | 1640015 | 2207.288 | 2250 |
| 长滩河 | 0.6 | 1.3 | 0.05 | 1200.00 | 1486 | 91000 | 2.67 | 40 | 5051567.2 | 3399.44 | 3500 |
| 大宁河 | 0.5 | 1.2 | 0.03 | 1297.23 | 4199 | 165000 | 2.67 | 35 | 18746419 | 4464.496 | 4327.6 |
| 开县小江 | 0.5 | 1.1 | 0.03 | 1194.00 | 5225 | 183000 | 2.67 | 30 | 19279192 | 3689.798 | 3968.8 |

4 结 论

笔者在分析研究库区主要环境因子对流域产沙影响的基础上, 基于侵蚀力学、水力学、水文学及泥沙运动力学等基本理论, 提出了较为完整的数学模型。上述所建模型是分散性的, 参数少, 过程明确, 概念清楚, 物理成因性强。尤其是产沙模型, 具有较强的泥沙运动力学基础, 反映了影响中小流域侵蚀产沙的主要因素。经三峡库区部分流域的应用验证可

知, 本模型可用于计算并预报三峡库区流域的产沙量, 评价水利水保措施的减沙效益并对流域水沙变化原因作出定量分析, 为三峡库区移民搬迁、水土保持、生态环境治理及三峡水库运行管理等提供了科学的、定量的、可靠的技术决策手段。

参考文献

[1] 季学武. 三峡水库的来沙分析[J]. 水利水电技术, 1998, 29(1): 40-43.

- [2] 姚文艺, 汤立群. 水力侵蚀产沙过程及模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- [3] 赵文俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社.
- [4] 王平义, 刘亚辉. 三峡库区主要环境因子对流域产沙的影响及对策研究——实验报告[R]. 重庆交通学院, 2002.

Mathematical model on sediment yield of middle/small watershed at the area of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Ji-sheng, WANG Ping-yi, LIU Ya-hui

(School of River & Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: This paper is to study a sediment yield model of middle/ small watershed at the area of Three Gorges Reservoir. Based on the influence of environmental factor on the sediment yield from watershed, a calculation formula of the sediment yield from watershed is deduced. With the calculation formula of water flow, a mathematical model with clear conception and definite process and complete structure of sediment yield from watershed is developed. The model is verified with measured data of some basins of Three Gorges Reservoir and the results are satisfactory.

Key words: Three Gorges; watershed sediment; runoff erosion; model

责任编辑: 袁本奎

(上接 113 页)

工程领域的的使用将会越来越得到重视, 建立“虚拟汽车”和“虚拟试验场”, 是汽车 CAE 工程的任务和必然趋势。

参考文献:

- [1] 袁士杰, 吕哲勤. 多刚体系统动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [2] 陆佑方. 柔性多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [3] ADAMS Using Guide, Mechanical Dynamics, Inc., 2002.
- [4] ADAMS 机械系统运动学与动力学分析软件[R]. 美国 IMAG 公司, 1994.
- [5] 詹文章. 汽车独立悬架多体系统动力学仿真及转向轮高速摆振研究[D]. 吉林大学, 2000.
- [6] 封 飏. 汽车动力学特性仿真分析与 ADAMS 软件[J]. 城市车辆, 2001, (3): 13-15.
- [7] Using ADAMS/ Car, Mechanical Dynamics, Inc., 2002.

ADAMS and the application of it in the dynamic simulation analysis of automobiles

MA Yi-kun, JIA Ce, LUAN Yan-long, HU Zhi-guo

(School of Machine Traffic Transportant, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: this paper gives a brief concept and the research methods of dynamic analysis, and introduces the basic theory and the calculational methods of the ADAMS software. At last, it introduces the application of ADAMS in the dynamic simulation analysis of the automobile.

Key words: automobile; ADAMS; simulation; dynamics of multibody system

责任编辑: 袁本奎