

国内主要流域侵蚀产沙模型评述

王占礼, 黄新会, 牛振华

(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, 杨陵 712100)

摘要: 流域侵蚀产沙模型是国际土壤侵蚀研究的重点领域之一, 国内以往进行了较多研究, 建立了许多模型。正确分析和评价这些模型对于合理地使用它们进行流域侵蚀产沙预报和水土保持规划等工作具有重要意义。从研究方法、模型结构、模型中各参数的确定等方面对我国主要流域侵蚀产沙经验模型和具有一定成因的模型进行了分析, 并在此基础上对各模型进行了评价。

关键词: 流域; 侵蚀产沙; 模型

中图分类号: S 157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 04-0028-06

Review of Models of Soil Erosion and Sediment Yield in Catchment in China

WANG Zhan-li, HUANG Xin-hui, NIU Zhen-hua

(The State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A model of soil erosion and sediment yield in catchment is one of main research areas of soil erosion in the world. Many models of soil erosion and sediment yield in catchment were developed in China. Reasonable application of these models to the prediction of soil erosion and sediment yield, and soil conservation decision in catchment is very important. We introduced research methods, structures, parameter descriptions of main empirical models and physically-based models of soil erosion and sediment yield in catchment in China, and made an analysis of characteristics of these models.

Key words: catchment; soil erosion and sediment yield; prediction model

流域是径流产生汇集、土壤侵蚀发生发展及开展水土保持工作的基本单元。流域侵蚀产沙模型研究是国际土壤侵蚀研究的重点领域之一。我国在该领域以往进行了较多研究, 并建立了许多模型。正确分析和评价这些模型对于合理地进行流域侵蚀产沙预报、水土流失综合治理减沙效益评价、水土保持与生态环境建设规划以及科学地指导我国土壤侵蚀预报模型的进一步研发等工作具有重要意义。目前国内建立的流域侵蚀产沙模型主要包括经验模型和具有一定成因的模型, 本文评介其中的主要模型。

1 经验模型

1.1 江忠善、宋文经模型^[1]

1.1.1 研究方法

根据陕北绥德、子洲、延安、晋西离石、陇东南天水等地的黄土丘陵沟壑区 10 条典型沟道小流域(0.18~187 km²) 1954~1970 年间的 406 场次洪水径流泥沙实测资料, 在分析影响流域产沙的降雨径流、地形、土质、植被因素以及产沙特征的基础上, 选取洪水径流总量、流域平均坡度、黄土中沙粒粉粒含量和植被作用系数作为产沙量预报的指标。通过多元回归

分析, 得出未治理小流域次暴雨洪水产沙量预报公式。

1.1.2 模型表达式

$$M_s = 0.37M^{1.15}JKP$$

式中: M_s ——一次暴雨的流域产沙模数(t/km²); M ——一次暴雨的洪量模数(m³/km²); J ——流域平均坡度, 以比值计; K ——土壤可蚀性因子, 以黄土中沙粒和粉粒占总量比例表示可蚀性指标, 以小数计; P ——与流域植被度有关的植被作用系数, 查“植被度与植被作用系数关系”图。

1.1.3 模型中各参数的计算

(1) 一次暴雨洪水径流总量的确定

$$W = 0.054(L/J_0^{1/3})^{0.58}Q^{0.86}$$

式中: W ——次暴雨洪水径流总量(10⁴ m³); Q ——洪峰流量(m³/s); L ——流域长度(km); J_0 ——流域主沟道平均比降, 以比值计。

有了洪水总量 W , 即可计算出洪量模数 M 值。从水土保持工程设计出发, 建模者还给出了不同频率洪峰流量模数和洪峰流量的计算式。

不同频率下设计洪峰流量模数的计算公式为:

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40335050); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-442); 中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿专项经费资助项目
作者简介: 王占礼(1960-), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀研究。

$$q_p = C \frac{J_0^{0.37} A^{0.22}}{L^{1.1}}$$

不同频率下设计洪峰流量的计算公式为:

$$Q_p = C \frac{J_0^{0.37} A^{1.22}}{L^{1.1}}$$

以上两式中: q_p ——设计洪峰流量模数 [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$]; Q_p ——设计洪峰流量 (m^3/s); A ——流域面积 (km^2); B ——流域平均宽度 (km); C ——与重现期 N 有关的参数, $N = 10$ 年, $C = 220$; $N = 20$ 年, $C = 290$; $N = 50$ 年, $C = 420$ 。

(2) 流域平均坡度

其值可依据地形图量测数据, 用下式计算:

$$J = \frac{\Delta H (0.5L_0 + L_1 + L_2 + \dots + L_{n-1} + 0.5L_n)}{A}$$

式中: ΔH ——相邻两等高线间等高距 (m); $L_0, L_1, L_2, \dots, L_n$ ——各条等高线长度 (km); J, A ——意义同上。

(3) 植被作用系数

植被作用系数是指有植被覆盖与裸露对照径流小区侵蚀量的比值。根据天水水土保持科学实验站的农地小区资料绘成图 1, 供应用参考。

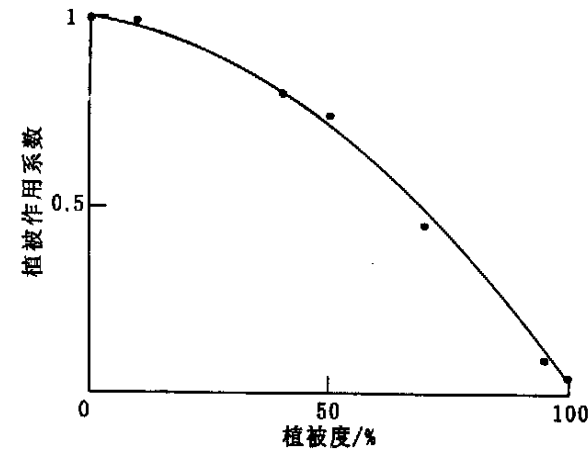


图 1 植被度与植被作用系数关系

1.1.4 总体评价

该模型结构较为合理, 考虑的因素较全面, 能反映小流域侵蚀动力、地形、土壤、植被等因素对流域产沙的综合影响, 适用于黄土丘陵沟壑区没有或很少开展水土保持工作的面积小于 200 km^2 小流域产沙量的计算。该模型由于没有考虑水土保持因子, 因此, 不能用于流域水土保持治理的减沙效益评价。该模型也不能在没有较长期小流域实测径流资料的地区直接应用。该模型预报的只是流域总产沙量, 而没有产沙部位的信息, 因此, 对于流域内部进行水土保持措施的配置无法使用。

1.2 牟金泽、熊贵枢模型^[2]

1.2.1 研究方法

根据黄土丘陵沟壑区第一副区陕北子洲岔巴沟流域六个断面 8~11 年 246 次实测资料, 选取洪量模数、洪峰模数、年径流模数、主沟道平均比降、流域长度为指标, 经回归分析得出小流域一次洪水和全年的产沙量预报模型。

1.2.2 模型表达式

(1) 一次洪水产沙量计算公式

$$M_s = 0.25 (M + q_p)^{1.07} J_0^{0.2} L^{0.4}$$

(2) 年产沙量计算公式

$$M_s = 0.095 M_0^{2.0} J_0^{0.28} L^{0.25}$$

二式中: M_s ——一次洪水流域产沙模数 (t/km^2); M ——一次洪水洪量模数 (m^3/km^2); q_p ——洪峰模数 [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$]; M_0 ——年径流模数 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$); J_0 ——流域主沟道平均比降 (%); L ——流域长度 (km)。

1.2.3 模型中参数的确定

(1) 设计洪峰模数 q_p

$$q_p = C \frac{J_0^{1/3} A^{0.18}}{L}$$

式中: J_0, L ——意义同上; A ——流域面积 (km^2); C ——与重现期 N 有关的参数, $N = 10$ 年, $C = 179 \times 10^3$; $N = 20$ 年, $C = 262 \times 10^3$; $N = 50$ 年, $C = 375 \times 10^3$ 。

(2) 设计洪量模数 M

$$M = 0.26 q_p \left(\frac{L}{J_0^{1/3}} \right)^{0.54}$$

(3) 流域长度 L

$$L = 1.58 A^{0.5}$$

(4) 主沟道平均比降 J_0

$$J_0 = 0.61 A^{-0.42}$$

1.2.4 总体评价

该模型经用研究区以外的实测资料进行验证, 基本上满足实用精度要求。该模型考虑因子也少, 未能较全面反映侵蚀产沙因子对流域产沙的综合影响, 并且也是针对未治理流域的预报模型, 不可用于流域水土保持治理减沙效益评价。该模型不仅选择的研究区范围小, 预报的也只是流域总产沙量, 而没有产沙部位的信息, 因此, 对于流域内部进行水土保持措施的配置无法使用。

1.3 尹国康模型^[3]

1.3.1 研究方法

根据晋、陕、甘黄土覆盖区 58 个小流域 ($0.193 \sim 329 \text{ km}^2$) 1954~1982 年间的观测和调查资料, 通过对 21 个变量进行筛选, 以径流模数、流域长度、流域沟壑密度、流域高差比、地面沟壑切割深度、流域植被度与治理度、地面岩土抗蚀性因素等作为影响流域产沙的主要指标, 通过回归分析得出小流域年产沙模型。

1.3.2 模型表达式

$$M_{sa}/M_{wa} = 31.83 I^{0.83}$$

式中: M_{sa} ——年产沙模数 (t/km^2); M_{wa} ——年径流模数 (m^3/km^2); I ——流域地表综合特性指标。

1.3.3 模型中参数 I 的确定

$$I = R_h^{0.6} D_h^{0.2} R_p^{-0.8} R_s^{-3.5}$$

式中: R_h ——流域高差比 (%); D_h ——地面崎岖度, $D_h = Dh/D$, D ——沟壑密度 (km/km^2), h ——沟壑切割深度 (m); R_p ——流域治理度, 即有治理措施部分的有效面积与流域总面积之比 (%); R_s ——地面组成物质的抗蚀性因素, 取值范围见表 1。

1.3.4 总体评价

该模型是在对较多变量进行筛选分析后建立的, 考虑因素较全面, 并且考虑到了治理措施。但该模型预报的也只是流域总产沙量, 而没有产沙部位的信息, 因此, 对于流域内部进行水土保持措施的具体配置无法使用。

1.4 范瑞瑜模型^[4]

1.4.1 研究方法

根据陕北、晋西、陇东不同地区 1954~1982 年间 16 个小流域 ($0.18 \sim 187 \text{ km}^2$) 的实测资料, 选用降雨影响因子、土

壤可蚀性指标、流域平均坡度、植被影响侵蚀系数和工程影响土壤侵蚀系数作为定量指标,通过多元回归分析,建立小流域年产沙模型。

表 1 地面组成物的抗蚀性因素			
物质	抗蚀性指标 R_s	物质	抗蚀性指标 R_s
		90	3~4
		90~80	4~5
现代冲积土	0.5~1	80~70	5~6
马兰黄土	1~2	70~60	6~7
离石黄土	1.5~2.5	残积坡积物(粒径	60~50
午城黄土	2~3	< 2 mm 颗粒含量%	50~40
保德黄土	3~5		40~30
残积坡积物	3~5		30~20
			20~10
			< 10
			12~15

1.4.2 模型表达式

$$M_s=6.49R^{1.573}K^{1.235}J^{1.328}C^{1.491}P^{1.858}$$

式中: M_s ——年产沙模数(万 t/ km² · a); R ——降雨影响侵蚀因子; K ——土壤可蚀性指标; J ——流域平均坡度; A ——植被影响侵蚀系数; P ——工程措施影响侵蚀系数。

1.4.3 各因子确定

(1) R 因子

$$R=10^{-3}(E_n+P_c^{0.88})$$

式中: E_n ——年暴雨总能量之和(J/ m²); P_c ——汛期降雨量(mm)。

(2) K 因子

采用大于 0.05 mm 的粒径含量与易溶盐百分含量之和,以小数计。

(3) J 因子

根据流域地形图,按下式计算:

$$J=\frac{\Delta H(0.5L_0+L_1+L_2+...+0.5L_n)}{A}$$

对地形起伏,山高坡陡的流域采用:

$$J=\frac{\Delta H \cdot \sum L}{A}$$

式中: L_0 、 L_1 L_n ——流域内各等高线的长度(km); ΔH ——相邻两等高线间的高差(km); L ——流域内等高线长度的总和(m); A ——流域面积(km²)。

(4) C 因子:

$$C=a_0e^{-5.1724x}$$

式中: X ——流域汛期(6~ 9 月) 平均植被度,以小数计; a_0 ——系数,取值 1.0。

(5) P 因子

$$P=1-\frac{a_1^{1.35}+a_2+a_3+\alpha_4+a_5}{1500A}$$

式中: a_1 ——流域内淤地坝可淤面积; a_2 ——水平梯田面积; a_3 ——塬平地面积; a_4 ——水地面积; a_5 ——滩地面积; A ——流域总面积。

1.4.4 总体评价

该模型对影响小流域土壤流失量的因子考虑的较全面,能反映小流域降雨、地形、土质、生物与工程措施对流域产沙的综合影响,预报精度可以满足一般工程设计、流域总体水土保持规划和综合治理减沙效益计算的需要,适用于 200 km² 以内自然地理特征类似的流域。该模型预报的也只是流

域总产沙量,而没有产沙部位的信息,因此,对于流域内部进行水土保持措施的配置无法使用。

1.5 孙立达模型^[5]

1.5.1 研究方法

根据宁夏西吉县 165 座水库、塘坝小流域的调查和测量资料,选择年降雨侵蚀力、年降雨复合参数、流域平均坡度、流域平均坡长、流域面积、流域长度、流域形状参数、林带面积与流域面积的比值、梯田、平地面积与流域面积比值、坡耕地与流域面积的比值等指标,采用逐步回归分析法建立了适合于不同面积尺度范围的小流域年单位面积土壤流失量预报方程。

1.5.2 模型表达式

(1) $A=10\text{ km}^2$ 小流域年单位面积土壤流失量预报方程

$$\ln Y=-102.016+94.997S^{1/40}+13.198(ER)^{1/30}-5.626(F/e^H)+0.076A-0.018L^2-0.246S_h$$

(2) $10\text{ km}^2<A=50\text{ km}^2$ 小流域年单位面积土壤流失量预报方程

$$\ln Y=-20.872+12.883(ER)^{1/30}-18.465(FT)+11.85S^{1/4}-5.948(F/e^H)+0.603H-0.083A+0.416L+2.822S_h$$

式中: Y ——年单位面积土壤流失量(t/ km² · a); S ——流域平均坡度; E ——年降雨侵蚀力(100 J/ m²); R ——年降雨复合参数; F ——林草面积与流域面积的比值; H ——坡耕地面积与流域面积的比值; A ——流域面积(km²); L ——流域长度(km); S_h ——流域形状参数; T ——水平梯田、平台地面积与流域面积比值。

1.5.3 各因子的确定

(1) 年侵蚀力

$$E=0.19h-1.22$$

(2) 降雨复合参数

$$R=1.77h-133.03$$

上二式中: h ——年降雨量(mm)。

(3) 流域平均坡度

在 1/ 50 000 的地形图上求得:

$$S=0.25Z(l_{0.25}+l_{0.5}+l_{0.75})/A$$

式中: Z ——流域内相对高差(m); A ——流域面积(km²); $l_{0.25}$ 、 $l_{0.5}$ 、 $l_{0.75}$ ——分别是 0.25 Z 、0.5 Z 、0.75 Z 处的等高线长度(km)。

(4) 流域平均坡长

$$\lambda=l/2n(\text{km})$$

式中: $l=l_{0.25}+l_{0.5}+l_{0.75}$ (km); n ——等值线上的极值点数。

(5) 流域长度

为由坝址处(流域出口) 起顺主沟道方向至分水岭最远点的距离(km)。

(6) 流域形状参数

$$S_h=A/L^2$$

1.5.4 总体评价:

根据影响土壤侵蚀的主导因子建立的小流域年土壤流失量预报方程,比较客观地反映了各个影响因子对小流域土壤侵蚀的综合作用,具有较高的精确度,可适用于宁夏西吉地区 and 与该地区气候、地形、土壤等自然条件相似的地区使用。本模型虽已在西吉县防护林工程建设和全县水土流失综合治理中广泛应用,但由于选择的的研究区范围小,预报的也只是流域总产沙量,而没有产沙部位的信息,因此,对于大

范围推广及流域内部进行水土保持措施的配置无法使用。

1.6 江忠善模型^[6,7]

1.6.1 研究方法

根据黄土丘陵区小流域侵蚀产沙的基本特征,以及沟蚀严重的特点,将小流域的沟间地和沟谷地两个地貌单元区别对待,依据安塞站 1985~1991 年及子洲团山沟 1961~1969 年实际观测小区资料分析建立的经验关系,分别建立了一种以计算沟间地和沟谷地单元地块土壤侵蚀为基础来推算小流域次降雨产沙量的计算模型。该模型被称之小流域地块侵蚀产沙模型。

1.6.2 模型表达式

(1) 沟间地土壤侵蚀模型(为坡面侵蚀模型,略)

(2) 沟谷地土壤侵蚀模型

$$M_g=(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nM_s)GC_gK$$

式中: M_g ——某一个计算单元的沟坡网格单元侵蚀模数(t/km^2); M_s ——该计算单元的沟间地第 i 个网格的侵蚀模数(t/km^2),由沟间地土壤侵蚀模型计算得到; G ——为沟蚀系数,无量纲; C_g ——沟坡植被影响修正系数,天然荒坡为 1,而对于人工林地和封育草地则参照沟间地林草地的计算方法和扣除荒坡植被现状覆盖度基数的影响加以确定; K ——土质类型修正系数,无量纲,对于黄土为 1; n ——该计算单元的沟间地网格地块总个数。

1.6.3 沟谷地土壤侵蚀模型沟蚀系数 G 的确定方法

$$G=1+\alpha[1.173(PI_{30})^{0.140}-1]$$

式中: α ——坡度修正系数。

1.6.4 总体评价

该模型分别建立了沟间地土壤侵蚀统计模型和沟谷地侵蚀概化模型,模型结构简单合理,考虑因素比较全面,其中以径流小区资料为基础建立的包括植被和浅沟侵蚀影响的沟间地侵蚀模型,可用于实际侵蚀量的计算,这是对坡面侵蚀建模的重要改进。模型结合 GIS 能反映侵蚀的空间变化,属于分布式模型,也是土壤侵蚀与水土保持工作者真正感兴趣的,可用于流域泥沙来源评价及水土保持规划等用途的土壤侵蚀模型。获得该模型依据的资料范围小,沟谷地土壤侵蚀模型有待于进一步完善。

1.7 金争平模型^[8,9]

1.7.1 研究方法

根据黄甫川流域 65 条小流域的库坝和水文测站调查测量资料,选取 17 个因子,首先进行单相关分析,确定出与侵蚀产沙相关显著的 11 个因子,再通过不同因子组合的多元回归分析,提取能通过较高相关性显著性检验的各个方程,最后优选出便于在不同工作条件下应用的预报小于 $30 km^2$ 的小流域泥沙侵蚀量的 5 个小流域多年平均侵蚀模数预报方程。

1.7.2 模型表达式

$$y=(9.9+0.743x_1^{1.5}+8.87x_6^{0.5}+1291x_{10}^{-1.2})^2$$

$$y=(14.53+0.285x_2+9.29x_6^{0.5}+1229x_{10}^{-1.2})^2$$

$$y=(-41.62+29.33x_3^{0.3}+8.99x_6^{0.5}+1261x_{10}^{-1.2})^2$$

$$y=(89.54+1.771x_1^{1.5}-49.67x_7^{0.1}+1534x_{10}^{-1.2})^2$$

$$y=(12.19+2.36x_1^{1.5}+1590x_{10}^{-1.2})^2$$

式中: y ——小流域多年平均侵蚀模数($t/km^2 \cdot a$); x_1 ——沟壑密度(km/km^2); x_3 ——沟壑切割裂度(‰); x_6 ——砒砂岩

面积比(‰),是砒砂岩面积与流域面积的比值; x_7 ——风沙土面积比(‰),是砂质土类面积与流域面积的比值; x_{10} ——植被覆盖度(‰)。

1.7.3 模型中参数的确定

(1) 沟壑密度 x_1

$$x_1=\frac{h_1+h_2+...+h_n}{A}$$

式中: h_1, h_2, \dots, h_n ——在 1:50 000 地形图上量算的各级沟道长度(km); A ——小流域面积(km^2)。

(2) 沟壑切割裂度 x_2

$$x_2=\frac{G_A}{A} \times 100\%$$

式中: G_A ——沟壑面积(km^2);

(3) 平均坡度 x_3

$$x_3=\sum S_i \cdot P_i$$

式中: S_i ——在 1:50 000 地形图上测量的各级坡度的中值(‰); P_i ——各级坡度面积与总面积的百分比。

1.7.4 总体评价

该模型建立了便于在不同工作条件下应用的多个预报方程,表明了影响皇甫川小流域土壤侵蚀地面因子的主导因子,尤其砒砂岩面积比与风沙土面积比对侵蚀的影响,反映了皇甫川小流域土壤侵蚀的独特规律。但该方程只适于在皇甫川流域使用,应用条件为:多年平均降雨量 400 mm 左右,年平均降雨侵蚀力 $800 MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$ 左右,岩土性质为黄土基质、砒砂岩、风沙土复合共存,以草植被为主,农地比例小于 30%,以水蚀为主的丘陵沟壑地貌区。该模型预报的只是流域总产沙量,而没有产沙部位的信息,因此,对于流域内部进行水土保持措施的配置无法使用。模型中也没有包括侵蚀动力因子,因此,该模型无法在较大范围推广应用。

2 具有一定成因的模型

2.1 汤立群模型^[10]

2.1.1 研究方法

该模型按自然水系将计算流域划分为若干单元流域,每个单元流域被概化为一本打开的“书”。又根据流域地形地貌和侵蚀产沙的垂直规律,将每个单元流域进一步划分为 3 个侵蚀产沙区:梁峁坡侵蚀产沙区;沟谷坡侵蚀产沙区;沟槽侵蚀产沙区。

整个模型由径流模型和侵蚀产沙模型两部分组成。其中侵蚀产沙模型分别按梁峁坡、沟谷坡、及沟槽,用不同的土壤侵蚀率公式计算各自的侵蚀率,并根据流域地貌特点和概化方法,将各区侵蚀率求和,求得单元流域总侵蚀率,各单元流域侵蚀率错开若干个时段叠加,可得到全流域出口的输沙率过程。

2.1.2 模型表达式

(1) 梁峁坡侵蚀率 E_r 的计算公式

$$E_r=A_r b_r \frac{y_m}{y_s-y_m}(\tau_0-\tau_c)V$$

(2) 沟谷坡侵蚀率 E_g 的计算公式

$$E_g=A_g b_g \frac{y_m}{y_s-y_m}(\tau_0-\tau_c)V$$

(3) 沟槽侵蚀率 E_c 的计算公式

$$E_c=B_c \frac{\overline{y_{mg}}}{y_s-\lambda_m} \tau_0^{3/2} V$$

式中: $A \sim A_g \sim B_c$ ——系数; b_k ——梁峁坡宽度; b_g ——沟谷坡宽度; γ_m ——混水容重; γ_s ——泥沙密实干容重; g ——重力加速度; τ ——各区坡面或沟槽水流的平均速度; τ_c ——斜坡上泥沙起动切应力。

(4) 单元流域土壤侵蚀率 E_T

$$E_T = 2(E_r + E_g) + E_c$$

(5) 全流域产沙量计算

若流域主沟道存在明显的冲淤变化, 则应将单元出口的泥沙过程演算到总出口断面; 若沟道或河道内基岩出露, 或者虽然不是基岩河床, 但沉积都较粗, 属砾石或粗砂, 可认为流域的泥沙输移比为 1, 这时, 流域出口断面的产沙过程可由各单元土壤侵蚀率错开若干个传播时段后叠加求得。

2.1.3 模型中各参数的确定

本模型的参数共计 14 个, 它们是反映流域水文泥沙特性的, 需通过具体降雨、流量和含沙量等洪水实测资料调试确定。方法是: 先按实测值或经验定出参数的初值, 然后, 用模型计算径流和泥沙过程, 再与实测过程比较, 做优化调试, 以误差最小原则确定参数最优值。

2.1.4 总体评价

该模型是分散性的, 其结构与参数物理概念清楚, 参数少而稳定, 可以模拟水沙时空变化过程, 适用于中、小流域的水沙预报和小流域的治理规划。该模型一方面将流域概化为“打开的书”, 忽略细沟、浅沟等侵蚀形态, 另一方面, 从微观出发推导计算公式, 难以将两种尺度的理论整合在一起。此外, 该模型中的许多参数在应用时需根据实测资料来调试确定。

2.2 谢树楠模型^[11]

2.2.1 研究方法

该模型将计算流域按自然水系划分为若干个子流域, 再将各个子流域按地貌的微观结构分成若干个基本计算单元。同时将流域内的所有雨量站按泰森多边形法划分成不同的控制区域, 该雨量站的降雨即代表控制区域内的所有计算单元的降雨。

该模型由产流模型与产沙模型两部分组成。对于产沙模型, 假定暴雨产生的径流为坡面一维流动, 压强按静水压强分布, 流动中的动量系数为常数, 不考虑泥沙的粘性, 沟道泥沙输移比为 1。根据水流连续方程、运动方程、泥沙连续方程和挟沙力公式联立求解, 导得流域侵蚀产沙量计算公式。

2.2.2 模型表达式

(1) 坡面产沙计算式

$$W_{sb} = 0.8237 S_{Bb} C_A C_E (fI)^{1.676} L^{0.176} S_{ob}^{1.272} D_{50}^{-0.658}$$

(2) 沟道产沙计算式

$$W_{sg} = 0.8237 S_{Bg} C_A C_E (fI)^{1.676} L^{1.676} S_{og}^{1.272} D_{30}^{-0.658}$$

(3) 时段产沙量

$$W_s = W_{sgt} + W_{sbi}$$

(4) 单元面积次暴雨总产沙量

$$W_s = \left(\sum_{i=1}^n W_{si} \Delta t_i \right) A$$

式中: W_{sb} ——坡面产沙量; W_{sg} ——沟道产沙量; W_{si} ——时段暴雨产沙量; W_s ——次暴雨总产沙量; C_A ——地表裸露率; C_E ——侵蚀因子; D_{50} ——土壤中值粒径; L ——单元坡面长度; S_{ob} ——坡面平均比降; S_{og} ——沟道平均比降; S_{Bb} ——某一土壤类型坡面所占比例; S_{Bg} ——某一土壤类型

沟道所占比例; Δt_i ——计算时段长; A ——单元面积; f ——径流系数; I ——降雨强度。

2.2.3 模型中参数的确定

(1) 裸露率 C_A

根据遥感遥测照片判译确定, 如植被很差, 可近似取 $C_A = 1.0$ 。

(2) 侵蚀因子 C_E

主要取决于流域坡面表土的固结程度、黏土比、分散比及沟壑密度等因素, 可由下式计算:

$$C_E = K E_{s0}$$

式中: E_{s0} ——开展水保前多年平均产沙模数; K ——系数, $K = 0.0015 \sim 0.0020$ 。

2.2.4 总体评价

该模型为大、中流域暴雨产沙模型, 模型考虑了侵蚀产沙的动力条件, 又包含有地面物质条件、地面形态结构因素以及多年实测产沙模型均值, 物理图形清晰, 降雨、径流、产沙过程的力学关系清楚, 是一种反映产沙因素较全面的流域暴雨产沙模型。该模型公式的推导过程中一些参数的确定结合了具体的应用流域, 使模型难以用于地形地貌差异较大的地区。

2.3 蔡强国模型^[12, 13]

2.3.1 研究方法

以晋西羊沟道小流域为对象, 以水流侵蚀力为主线, 依据侵蚀产沙的垂直分带规律, 将小流域侵蚀产沙分为坡面、沟坡、和沟道三个基本单元, 分别建立了各单元的次暴雨土壤侵蚀产沙预报模型。在建模过程中考虑了各单元之间的联系, 因此, 可谓小流域侵蚀产沙过程模型。

2.3.2 模型表达式

(1) 坡面子模型

① 坡面溅蚀分散量方程

$$D_b = 0.015 J (E_r / \lambda) e^{(2.68s \ln \theta - 0.48 C_r)}$$

式中: D_b ——坡面溅蚀分散量 (kg/m^2); J ——前期表土结皮因子, 当前期无表土结皮时为 1; E_r ——降雨动能 (J/m^2), 可依据 $E_r = 28.83 + 13.5 \log I$ 计算, I ——降雨强度 (mm/min); λ ——以标准锥体贯入测量得出的土壤抗剪切强度 (kPa), $\lambda = ae^{-bM_c}$, a 、 b ——经验系数, 由地表土壤容重而定, M_c ——土壤含水量 (%); θ ——坡度; C_r ——植被覆盖度 (%)。

② 坡面细沟侵蚀估算方程

$$D_r = 1.766 \times 10^{-7} E_r^{-4.8} \lambda^{-0.5}$$

式中: D_r ——细沟侵蚀模数 (kg/m^2); E_r ——细沟水流侵蚀力 (N/m^3), $E_r = 0.01 \rho_g H A \sin \theta$ 其中 ρ ——水的密度 ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), g ——重力加速度 ($9.8 \text{ m}/\text{s}$), H ——平均径流深 (mm), A ——单宽汇流面积 (m^2), θ ——坡度 ($^\circ$), λ 意义同前。

③ 坡面侵蚀状况判断

在没有细沟产生的情况下, 坡面土壤流失量 S (kg/m^2) 取决于降雨径流分散量 D_b 和水流输移能力 T_c 的对比关系:

若 $D_b < T_c$, 则 $S = D_b$;

若 $D_b \geq T_c$, 则 $S = T_c$ 。

当有细沟侵蚀发生时, 实际上土壤流失量为:

若 $E_b + E_r < T_c$, 则 $S = E_b + E_r$;

若 $E_b + E_r \geq T_c$, 则 $S = T_c$ 。

T_c 可用下式计算(单位: kg/m^2)

$$T_c = 0.0081 E_r^{1.55}$$

(2) 沟坡子模型

①沟坡面侵蚀预报模型

$$S_d = 511.07 Q_d^{0.865} S_c^{0.114}$$

式中: S_d ——次降雨沟坡侵蚀产沙模数(t/km^2); S_c ——上部坡面来沙量(t/km^2); Q_d ——沟坡径流深, 可依据下式计算:

$$Q_d = 0.00502 I_{30}^{0.323} E_K^{0.871} Q_c^{0.331}$$

式中: I_{30} ——30 分钟降雨强度(mm/h); E_K ——降雨能量($\text{J}/\text{m}^2/\text{mm}$); Q_c ——上坡来水量(mm)。

②三趾马红土沟坡上的泻溜侵蚀预报模型

$$S_g = 349.324 P_a^{-0.631} I_{30}^{0.367} Q_g^{1.054}$$

式中: S_g ——红土沟坡侵蚀模数(t/km^2); P_a ——前 9 天累积降雨量(mm); Q_g ——红土沟坡径流深(mm), $Q_g = 0.000107 E^{1.14} I_{30}^{1.04} P_a^{0.4}$, 式中: E ——降雨能量, I_{30} ——30 min 最大雨强。

③重力侵蚀预报模型

$$S_h = 2284.7 Q_h^{0.811}$$

式中: S_g ——重力侵蚀产沙模数(t/km^2); Q_h ——径流深(mm)。

$$Q_h = 0.0000086 I_{30}^{0.854} E^{-1.638}$$

④洞穴侵蚀预报模型

按洞穴发生的位置, 用沟头自然侵蚀量代表洞穴侵蚀量, 方程如下:

$$S_f = 386.33 Q_f^{1.04}$$

式中: S_f ——沟头自然实验小区侵蚀产沙模数(t/km^2); Q_f ——沟头部分的径流量(mm);。

$$Q_f = 0.000172 I_{30}^{2.343} E^{0.783}$$

⑤沟坡侵蚀模数计算

对以上四个主要组成部分计算得到的侵蚀产沙模数加权求和(平均), 即可得到流域沟坡部分的侵蚀模数。

(3) 沟道子模型

参考文献:

[1] 江忠善, 宋文经. 黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算[A] . 见: 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集[C] . 北京: 光华出版社, 1980. A3- 1, A3- 10.

[2] 牟金泽, 熊贵枢. 陕北小流域产沙量预报及水土保持措施拦沙计算[A] . 见: 第一次河流泥沙国际学术讨论会文集[C] . 北京: 光华出版社, 1980. A4- 1, A4- 10.

[3] 尹国康, 陈钦彦. 黄土高原小流域特性指标与产沙统计模式[J] . 地理学报, 1989, 44(1): 32- 46.

[4] 范瑞瑜. 黄河中游地区小流域土壤流失量计算方程的研究[J] . 中国水土保持, 1985, (2): 12- 18.

[5] 孙立达, 孙保平, 陈禹, 等. 西吉县黄土丘陵沟壑区小流域土壤流失量预报方程[J] . 自然资源学报, 1988, 3(2): 141- 153.

[6] 江忠善, 王志强, 刘志. 应用地理信息系统评价黄土丘陵区小流域土壤侵蚀的研究[J] . 水土保持研究, 1996, 3(2): 84- 97.

[7] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J] . 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1- 9.

[8] 金争平, 赵焕勋, 和泰等. 皇甫川区小流域土壤侵蚀量预报模型 方程研究[J] . 水土保持学报, 1991, 5(1): 8- 18.

[9] 金争平, 高志明, 王正文, 等. 皇甫川流域小流域地块土壤侵蚀预报模型及其应用[A] . 见: 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式[C] . 北京: 海洋出版社, 1992. 60- 84.

[10] 汤立群, 陈国祥, 蔡名扬. 黄土丘陵区小流域产沙数学模型[J] . 河海大学学报, 1990, 18(6): 10- 16.

[11] 陈国祥, 谢树楠, 汤立群. 黄土高原地区流域侵蚀产沙模型研究[A] . 见: 黄土高原水土保持[C] . 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 213- 229.

[12] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J] . 地理学报, 1996, 51(2): 108- 117.

[13] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M] . 北京: 科学出版社, 1998.

沟道的侵蚀可用泥沙输移比表示。这里泥沙输移比是指流域输沙量与流域内土壤侵蚀量之比, 用 SDR 表示, $SDR = 1$ 则发生侵蚀, $SDR < 1$, 则发生堆积, $SDR = 1$, 则侵蚀与堆积处于平衡状态。

经逐步多元回归分析得:

$$SDR = 0.0277 - 0.29 C^{0.19} S_m^{0.59} (E_a/E)^{0.44}$$

式中: R ——降雨量(mm); C ——径流系数(%); S_m ——最大水流含沙量(kg/m^3); E_a/E ——大于 $0.15\text{mm}/\text{min}$ 雨强的降雨动能与次降雨动能的比值。

当无法测量得到 S_m 及 C 时, 采用下式计算:

$$SDR = 0.738 P_a^{0.065} T^{-0.225} I^{0.66} (E_d/E)^{0.091}$$

式中: P_a ——前期影响降雨量(mm); T ——降雨历时(min); 平均雨强(mm/min); E_d/E ——意义同上。

④流域内的侵蚀总量 S 的计算

$$S = Y/SDR$$

式中: Y ——流域出口输沙量。

2. 3. 3 总体评价

该模型是在地理信息系统的支持下建立的一个有一定物理基础, 能表示侵蚀—输移—产沙过程的小流域次降雨侵蚀产沙模型。模型考虑了坡面、沟坡和沟道三单元之间的相互关系。在目前有一定物理基础的次降雨流域侵蚀产沙模型中, 该模型是需要输入变量较少的模型之一, 这就为该模型在黄土高原的推广应用奠定了基础。模型中一些计算方程的某些系数均以经验系数形式来表示, 只要依据当地实际野外观测资料对系数作一些修正, 就可以应用此模型进行流域侵蚀产沙计算。该模型对地表结皮和植被作用的估算过于概化, 降雨前期微地形和犁底层的影响未能考虑, 对长历时降雨计算偏低问题有待解决, 对洞穴侵蚀、泻溜侵蚀、泥沙在坡面和沟道的输移等, 还有待深入研究, 揭示其内在规律, 建立有更坚实物理基础的计算方程。总之, 目前建立的该小流域侵蚀产沙模型还仅仅是初步, 还需进一步修正, 提高其实用价值。