

水土保持减水减沙效益计算方法研究*

汤立群 陈国祥

(河海大学水文水资源及环境学院 南京 210098)

摘 要 介绍了三种水土保持减水减沙效益计算方法.通过分析比较和实际应用,认为模型法是合理可行的计算方法.所建模型能够模拟大中流域长系列水流泥沙过程,且有较好的移植性.本文方法应用于大理河流域水土保持减水减沙效益计算,效果良好.

关键词 水土保持,减水减沙效益,物理概念模型,计算方法

中图号 P333 ;TV214

我国是世界上水土流失最严重的国家之一.水土流失将直接导致沙化土地,减少良田,贫瘠土壤,枯竭水源,淤积河道,破坏环境等一系列不良后果,给工农业生产及人民生活带来极大的危害.控制水土流失的根本是水土保持,减少坡面径流和泥沙输移.水土保持措施可分为三大类:(a)工程措施,包括水利工程和水保工程.水利工程主要指水库和灌渠等,水保工程主要指淤地坝、梯田和谷坊等;(b)生物措施,主要指造林、种草等;(c)农业措施,主要指耕作方式和田间管理方式.水土保持措施具有减水减沙的作用,这种作用通过减水减沙效益加以量化和评价.因此,确定合理有效的便于应用的水土保持减水减沙效益计算方法是正确评价水保作用的基础,对流域综合治理具有指导意义,可为有关部门提供决策依据.

传统的水保效益计算方法有水文法和水保法两种.近年来,特别是通过“八五”攻关项目的研究,模型法逐步建立并开始应用于大中流域的水沙计算.本文分析了水文法、水保法和模型法的基本思想、特点及存在的问题.在此基础上,提出了适用于大中流域长系列径流泥沙模拟的物理概念模型,并用该模型计算了大理河流域水土保持减水减沙效益.

1 水 文 法

所谓水文法,就是通过对实测水沙资料的统计分析,建立降雨径流、降雨输沙或径流输沙之间的一个或若干个定量的相关关系,并利用这些相关关系计算某一时期治理流域在天然状态下的产流产沙量,与同一时期实测径流泥沙量相比,求得水土保持减水减沙效益的方法.水文法的优点是简单易用,对同一流域使用效果较好,计算结果反映的是水土保持减水减沙综合效益.

由于黄土地区的降雨与径流、降雨与输沙及径流与输沙之间关系密切,因此,根据无定河流域的实测资料,通过回归统计分析,可得该流域年径流量、年输沙量计算公式如下:

$$W = 82\,539 + 43.6976P\delta^{0.85} \tag{1}$$

$$W_s = 0.6304287P_s^{1.7198}(P_b/P_c)^{0.6153} \tag{2}$$

式中:W——年径流量;P——流域年平均降雨量; δ ——反映降雨在年内分配的参数; W_s ——年输沙量; P_s ——流域汛期平均雨量; P_b ——7、8两月雨量; P_c ——6、9两月雨量.

(1)、(2)两式的相关系数均大于0.9,相关程度显著,用于无定河流域水保效益计算,效果良好.但是,所建方程为经验方程,缺乏明确的物理意义,可靠性很大程度上取决于实测水沙资料的代表性,外延精度低,适用范围窄.

收稿日期:1997-08-24

第一作者简介:汤立群,男,副教授,水力学及河流动力学专业,主要从事河流与流域泥沙模拟研究.

* 国家自然科学基金重大项目(598902000-5-1-3)及国家“八五”重点科技攻关项目(85-926-03-01-01)的部分成果.

2 水 保 法

水保法是从人类活动对下垫面条件的改变而引起水沙变化的实际情况出发,根据各项措施数量、质量和蓄水拦沙指标等因素分别计算各项水利水保措施的减洪减沙量,进而计算水利水保措施的单项及综合减水减沙效益.

2.1 水利水保工程措施减水量计算

2.1.1 水利工程减水量

水利工程包括水库、灌渠、引洪淤滩等,其中引洪淤滩减水量用下式计算,其余的均用实测资料分析得到.

$$\Delta W_{\text{滩}} = (1 - K_1) W_{\text{洪}} f_{\text{滩}} \quad (3)$$

式中 $\Delta W_{\text{滩}}$ ——引洪淤滩减水量; $W_{\text{洪}}$ ——每公顷滩地引洪水量; $f_{\text{滩}}$ ——引洪淤滩面积; K_1 ——引洪淤滩水回归系数.

2.1.2 水保工程减水量

坡面措施减水量计算公式为

$$\Delta W_{\text{坡}} = \sum_{i=1}^n M_{W\text{坡}} f_i \eta_{Wi} \quad (4)$$

式中 $\Delta W_{\text{坡}}$ ——坡面措施减水量; $M_{W\text{坡}}$ ——坡面天然地表径流模数; η_{Wi} ——单项措施减水百分数; f_i ——各单项措施的面积.

沟道减水工程主要是淤地坝,其减水量计算公式为

$$\Delta W_{\text{坝}} = (1 - K_2) \alpha_1 \Delta W_{S\text{坝}} / \gamma_S \quad (5)$$

式中 $\Delta W_{\text{坝}}$ ——淤地坝的减水量; $\Delta W_{S\text{坝}}$ ——淤地坝的拦沙量; γ_S ——淤泥干容重; α_1 ——淤泥的孔隙率; K_2 ——地下水径流补给系数.

2.1.3 其他人类活动减水量

工农业与生活用水量由实际资料获得.

2.2 水利水保工程减沙量计算

2.2.1 水利工程减沙量

水库淤积量由实测资料分析计算得到,灌溉引沙量根据引水量、引水含沙量和灌溉面积等计算;引洪淤滩减沙量由引洪量、引洪含沙量和淤滩面积等计算.

2.2.2 水保工程减沙量

坡面措施减沙量用下式计算:

$$\Delta W_{S\text{坡}} = \sum_{i=1}^n M_{S\text{坡}} f_i \eta_{Si} \quad (6)$$

式中 $\Delta W_{S\text{坡}}$ ——坡面措施减沙量; $M_{S\text{坡}}$ ——坡面天然侵蚀模数; η_{Si} ——单项措施的减沙百分数; f_i 意义同前.

淤地坝拦沙量用下式计算:

$$\Delta W_{S\text{坝}} = (1 - \alpha_2) f S_{\text{坝}} \quad (7)$$

式中 $\Delta W_{S\text{坝}}$ ——坝地拦沙量; α_2 ——推移质和人工填土占拦泥量的百分数; f ——坝地面积; $S_{\text{坝}}$ ——每公顷坝地拦泥量.

2.2.3 其他人类活动(增)减沙量

工农业生产及生活用水减沙量,可根据用水量、含沙量等资料确定,开荒、开矿、修路、毁坝等人类活动会增加水土流失,流失量可由实测资料估算得到.

水保法考虑了各单项措施的减水减沙作用,计算结果既反映了单项措施的效果,又反映了水保措施的综合效果.但从本质上说,水保法仍是经验统计方法,计算可靠性取决于各水土保持措施的数量、分布、质量和拦水拦沙指标等落实的正确性.而这些量通常靠人工调查落实,往往带有较大的主观性,是长期以来影响水保法结果精度的主要原因.解决的办法之一是尽可能利用航片、卫片资料,建立水土保持地理信息系统,将水

土保持措施的种类、数量、面积、质量数值化 ,以提高基本资料的客观真实性.

3 模 型 法

3.1 模型

3.1.1 流域划分^[1]

黄土丘陵沟壑区每个沟道或小流域都是一个完整、独立的自然侵蚀、输沙、产沙系统 ,也是侵蚀地貌发育的基本单元.本文按自然水系将大理河流域具有水文测站的主要支流划分为单元流域 ,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 ,将其余面积划分为若干个区间单元.

3.1.2 模型结构与基本方程

模型由产流模型和产沙模型组成.产流模型将径流总量区分成超渗坡面径流和地面以下径流两部分.地面径流用超渗产流理论计算 ,地面以下径流用地下水线性水库演算法计算 ,汇流用马斯京根分段连续演算法.产沙模型从径流侵蚀力概念出发 ,推导出坡面(梁峁坡 + 沟谷坡)^[2]侵蚀产沙计算公式 ,忽略单元流域沟道泥沙的冲淤变化 ,即得每一单元上的产沙量.

a. 产流模型基本方程

$$\alpha_s = (1 - \frac{F_c}{P_{\max}})(1 - K_w \frac{W_m - W}{W_m}) \frac{P}{P_{\max}} \tag{8}$$

其中

$$F_c = (1 - \alpha_{\max})P_{\max} \tag{9}$$

式中 : α_s ——变径流系数 ; P ——时段降雨量 ; W_m ——土壤最大含水量 ; W ——实际土壤含水量 ; $P_{\max}$ ——时段最大降水量 ; K_w ——系数 ; F_c ——稳定下渗率 ; $\alpha_{\max}$ ——饱和径流系数.

时段坡面产流量 R_S 计算如下^[3] :

$$R_S = \alpha_s P \tag{10}$$

地面以下径流量由下式计算 :

$$R_g = K_d W \tag{11}$$

式中 : R_g ——地面以下径流量 ; W ——地下水蓄量 ; K_d ——时段出流系数.

河道汇流采用马斯京根法连续演算 ,单一河段的演算式为

$$Q_j^i = C_0 Q_{j-1}^i + C_1 Q_{j-1}^{i-1} + C_2 Q_j^{i-1} \tag{12}$$

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 ——与河道水力特性有关的参数 ,满足 $C_0 + C_1 + C_2 = 1$.

b. 产沙模型基本方程^[2]

$$W_T = \frac{5}{3} C_A R_S A F [(A_S - A_r) L_1^{8/5} + A_r (L_1 + L_2)^{8/5} + \frac{6}{5} B_s L_1 + \frac{6}{5} B_r L_2] \tag{13}$$

式中 : W_T ——时段产沙量 ; R_S ——时段坡面径流量 ; AF ——流域面积 ; L_1 , L_2 ——梁峁坡、沟谷坡坡长 ; C_A ——系数 ,由实测资料率定. A_S , A_r , B_s , B_r 分别计算如下 :

$$A_s = \gamma d^2 (q_w n_s)^{3/5} \tan^{0.7} \alpha_s \tag{14}$$

$$B_s = (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_s - f (\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_s \tag{15}$$

$$A_r = \gamma d^2 (q_w n_r)^{3/5} \tan^{0.7} \alpha_r \tag{16}$$

$$B_r = (\gamma_s - \gamma) d^3 \sin \alpha_r - f (\gamma_s - \gamma) d^3 \cos \alpha_r \tag{17}$$

式中 : γ ——水的容量 ; γ_s ——泥沙容量 ; d ——泥沙粒径 ; q_w ——坡面径流率 ; n_s , n_r ——梁峁坡与沟谷坡上的坡面糙率 ; α_s , α_r ——梁峁坡与沟谷坡的坡度 ; f ——摩擦系数.

3.2 模型参数率定及验证

本模型参数的率定及验证在大理河流域上实现.

3.2.1 大理河流域概况

大理河流域位于陕西省北部 ,面积 3 906 km² ,是无定河的最大支流.青阳岔站以上为河源梁涧区 ,其余面积均处于黄土丘陵沟壑区.该流域地形破碎 ,植被稀疏 ,水土流失严重.大理河流域的地貌特征可划分为三类

最基本的形态单元,从坡顶到沟床依次为沟间地、沟谷地和沟床,形成地貌形态及坡度的垂直变化规律。

大理河流域的水文测站主要有青阳岔、李家河、曹坪和绥德,其中绥德站是大理河流域的出口站,控制流域面积 3 893 km²。流域治理措施主要有造林、种草、修水平梯田和淤地坝等,治理面积 667.8 km²,占流域总面积的 17.1%。

大理河流域划分为 5 个单元流域,其中 3 个单元出口有实测水沙资料,各是青阳岔、小理河(李家河站)和岔巴沟(曹坪站),其余是区间单元,全流域以绥德为控制站。

3.2.2 参数率定与模型验证^[1]

本模型需要率定的参数有产流参数和产沙参数。利用青阳岔和小理河 1959~1964 年资料分别率定,见表 1。率定后的模型应用于岔巴沟 1959~1969 年产流产沙量计算,结果令人满意。

表 1 产流产沙参数率定结果

Table 1 The parameters of runoff and sediment yield

流域	$\alpha_{\max}$	W_m	K_d	C_A	K_w	n_s	n_r
青阳岔	0.25	450	0.002	1.10	0.1	0.038	0.040
小理河	0.22	450	0.002	1.10	0.1	0.038	0.040

4 水土保持减水减沙效益计算

设大理河流域 70、80 年代流域出口实测径流泥沙量分别为 W' 、 W'_s ,用模型法计算 70、80 年代可能的产流产沙量分别为 W'' 、 W''_s ,则水土保持减水减沙效益由下列各式计算^[4]:

$$\Delta W'' = W'' - W' \tag{18}$$

$$\Delta W''_s = W''_s - W'_s \tag{19}$$

$$\eta'' = \Delta W'' / W'' \times 100\% \tag{20}$$

$$\eta''_s = \Delta W''_s / W''_s \times 100\% \tag{21}$$

式中 $\Delta W''$ 、 $\Delta W''_s$ ——水土保持减水减沙量; η'' 、 η''_s ——水土保持减水减沙效益。

4.1 产流产沙过程模拟

模型应用于大理河流域长系列(1959~1989 年)径流泥沙过程的模拟计算,各单元出口的径流泥沙演算到大理河出口,便得全流域的长系列径流泥沙过程。在 5 个单元之中,除青阳岔用自己的参数外,其余 4 个单元都用小理河流域上率定的参数。本模型的时间步长是月,用式(8)~(17)可以计算出大理河流域及各单元历年各月的产流产沙量,大理河流域及各单元 70~80 年代的年均结果见表 2。

表 2 大理河流域减水减沙效益计算结果

Table 2 The benefits of water and sediment reduction on Da Lihe basin

年代	青 阳 岔						李 家 河					
	径流量			输沙量			径流量			输沙量		
	实测值 /万 m ³	计算值 /万 m ³	效益 /%	实测值 /万 t	计算值 /万 t	效益 /%	实测值 /万 m ³	计算值 /万 m ³	效益 /%	实测值 /万 t	计算值 /万 t	效益 /%
70	2263.9	2764.3	-18.1	458.2	734.3	-37.6	2482.9	2863.7	-13.3	325.0	880.9	-63.1
80	2291.0	2574.1	-11.0	187.8	664.1	-71.7	2184.5	2841.6	-23.1	197.2	857.3	-77.0
70~80	2277.7	2669.2	-14.7	323.0	699.2	-53.8	2333.7	2852.7	-18.2	261.1	869.1	-70.0
年代	曹 坪						绥 德					
	径流量			输沙量			径流量			输沙量		
	实测值 /万 m ³	计算值 /万 m ³	效益 /%	实测值 /万 t	计算值 /万 t	效益 /%	实测值 /万 m ³	计算值 /万 m ³	效益 /%	实测值 /万 t	计算值 /万 t	效益 /%
70	856.8	923.1	-7.2	159.9	314.0	-49.1	14673.0	15510.0	-5.4	3854.0	4478.0	-13.9
80	694.7	852.1	-18.5	78.1	275.7	-71.7	11778.0	14077.0	-16.3	1977.0	3958.0	-50.1
70~80	775.0	887.6	-12.6	119.0	294.9	-59.6	13226.0	14794.0	-10.6	2916.0	4218.0	-30.9

4.2 减水减沙效益计算及分析

4.2.1 大理河流域减水减沙效益

由表 2 所示的年均值,应用公式(20)(21)可方便地计算出大理河流域及各单元 70~80 年代水利水保措施的年均减水减沙效益(以下皆为年均值),见表 2.大理河流域综合治理减水效益 70 年代为 5.4%,减少径流 0.837 亿 m³,减沙效益为 13.9%,减少泥沙 0.624 亿 t;80 年代减水效益为 16.3%,减少径流 2.299 亿 m³,减沙效益为 50.1%,减少泥沙 1.981 亿 t.

4.2.2 计算结果的合理性分析

表 2 表明,大理河支流的减水减沙效益明显高于全流域,说明该流域内的水利水保措施分布并不均匀,主要集中在青阳岔、小理河、岔巴沟等支流.表中 80 年代的减水减沙效益高于 70 年代的,主要原因是:(a)1977,1978 年是大水年,流域上库坝毁坏严重,以致来水来沙量实测值偏大;(b)80 年代降水量及降雨强度明显减小,来水来沙量较少,对于少水少沙年,水保措施尤其是工程措施如水库、淤地坝等的减水减沙效益十分明显.

表 2 的另一个特点是减沙效益明显高于减水效益,这可从水流泥沙及其运动特性的差异加以解释:作为水利水保措施,其目的是蓄水拦沙,减少水土流失,而水利水保措施对水沙的作用并不相同,尤其是工程措施,拦沙的效果要好于蓄水的效果.比如,在坡面上修建了梯田以后,坡面比降明显减小,有的甚至为零,有效坡长也大幅度减小.这样一方面可有效地减少当地的土壤侵蚀;另一方面,来自上坡的水沙因比降的减小,水流的挟沙能力大大降低,使得大量泥沙淤积下来,而不能被水流带走.对于水流来讲,尽管比降的减小减缓了其运动速度,会增加其下渗量,但如果上坡来量较大时,仍然有许多径流向下游运动.再者,大量的水流下渗后,在一定的条件下仍会在下游某地露头,形成饱和坡面流,这种径流在地面下运动时,侵蚀输沙量很小,但对于径流总量来说,并没有损失,只是影响其过程而已.再比如在沟道内建设的库坝群,尤其是淤地坝,在蓄水初期可有效地减水减沙,但随着泥沙的淤积、库容的减小,使得淤积区的河道比降大幅度减小.减水的最有效的办法是预留足够的库容,库容减小,蓄水效果便减小,泥沙在库坝运营初期可大量淤积,到了后期,虽然无多少有效库容,但因比降减小,当洪水进入淤积区时,水流无法将大量的较粗泥沙带出库外而进一步淤积减少.因此,水利水保工程措施减沙的效果比减水的效果好得多.

5 结 论

a. 本文建立的模型具有较强的理论基础,物理概念清楚,成因性强,能模拟发生在流域上的主要径流侵蚀产沙输送过程,在一定程度上摆脱了水沙相关的经验性烙印和确定各种水保措施种类、数量、质量及分布时的主观影响.因此,是治理流域在天然状态下径流泥沙还原计算的有效方法.

b. 用模型法计算水土保持减水减沙效益是可行的,能够满足水保效益评价的要求,并可进一步用于水沙变化趋势的预测,具有推广应用的价值.

c. 应用本模型的计算结果表明:大理河流域综合治理减水效益 70 年代为 5.4%,减少径流 0.837 亿 m³,减沙效益 13.9%,减少泥沙 0.624 亿 t;80 年代减水效益为 16.3%,减少径流 2.299 亿 m³,减沙效益 50.1%,减少泥沙 1.981 亿 t.以上结果具有两个特点:一是 80 年代的减水减沙效益高于 70 年代;二是水利水保措施的减沙效益明显高于减水效益.这与流域上实际发生的情况是一致的.

d. 应用模型法计算水土保持减水减沙效益的关键是做好参数的率定工作,它将直接关系到模型的计算精度,今后应同时将三种方法对同一流域的水保效益进行计算,并作对比分析;模型法适用于黄土地区大中流域的水沙模拟和水保效益计算.

参 考 文 献

1 汤立群 陈国祥.大中流域长系列径流泥沙过程模拟.水利学报,1997,6:19~26
2 汤立群 陈国祥.坡面土壤侵蚀公式的建立及其在流域产沙计算中的应用.水科学进展,1994,5(2):104~110
3 包为民.中大流域水沙耦合模拟物理概念模型.水科学进展,1994,5(4):287~292
4 张胜利 于一鸣 姚文艺.水土保持减水减沙效益计算方法.北京:中国环境科学出版社,1994.72~90

Study on Calculation Methods of Benefits of Water and Soil Conservation

Tang Liquan Chen Guoxiang

(College of Water Resources and Environment ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Abstract Three calculation methods of the benefits of water and soil conservation are introduced in this paper. Comparisons of the three methods and application of measured data indicate that the model method is a reasonable and feasible calculation method. The model can be used to simulate the long-series flow and sediment processes in large and medium river basins and has a good transplantability. The method has been applied to calculate the benefits of water and sediment reduction in Da Lihe basin and the result is satisfactory.

Key words water and soil conservation ;benefits of water and sediment reduction ;physical conceptual model ;calculation method

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊 ,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术讨论、研究动态等学术性文章 ,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年 ,是全国中文核心期刊 ,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中 ,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果 ,部分达到了国内领先和国际先进水平 ,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议 ,发挥了较大的社会效益和经济效益 ,深受工程界和科技界赞许 ,并于 1989 年分别获得江苏省和全国高等学校自然科学学报优秀编辑质量一等奖。本刊每逢单月出版 ,国内外公开发行 ,邮发代号 28-63 ,每份定价 8.00 元 ,全年订费 48.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系 ,联系地址 :南京市西康路 1 号《河海大学学报》编辑部 ,邮政编码 210098。