

# 山丘区小流域降雨侵蚀及产沙模型研究

田守岗

于立芬

(山东省水利科学研究院·济南市·250013) (沂水县水利局)

**摘要** 该文选用山东省有代表性的福山小流域试验资料,对山丘区小流域降雨侵蚀和产沙规律进行了研究,提出了山丘区小流域降雨侵蚀的产沙模型。不仅为小流域综合治理提供了科学依据,还可满足小流域河流产沙预测预报的要求。

**关键词:** 小流域 降雨侵蚀 产沙模型

## Rainfall Erosion and Its Model of Sediment Yield in Small Watershed of Hilly Area

*Tian Shougang*

*Yu Lifen*

(*Shandong Institute of Hydraulics, 250013, Ji nan, PRC*) (*Water Conservancy Bureau of Yishui County*)

**Abstract** According to the tested date of Fushan small watershed in Shandong province, the rainfall erosion and the pattern of sediment yield at small watershed of hilly area are analyzed. The model of the sediment yield is presented. It can fit the requirment of the sediment yield forecast for rivers, and can also provide a scientific basis for the comprehensive harness at small watershed.

**Keywords** small watershed; rainfall erosion; sediment yield model

随着人口增长和工农业生产的发展,山丘区的土地开发利用程度不断提高,加之植被的破坏,水土流失十分严重。水土流失是土地灾害中危害最为广泛的一种,它可导致土层变薄,地力下降,裸岩和砂砾化面积增加,使人类丧失赖以生存的条件;还可造成河床水库淤积,水资源短缺,生态失调,环境恶化,直接制约农牧业生产的发展和人民群众生活水平的提高,制约国民经济的发展。自然因素是水土流失发生发展的客观潜在条件;人类不合理的生产活动是加剧水土流失的主要因素。水土流失是人类自身造成的危及生存环境的三大公害之一,可见,水土保持是人口、资源与环境协调发展必须解决好的一个大问题。小流域是土壤侵蚀、产沙和输沙的基

本单元,为了对山丘区小流域的降雨侵蚀规律进行深入研究,为综合治理提供科学依据,我们选择山东省有代表性山丘区小流域建立水土保持试验区,对水文、气象、地下水及河流泥沙等进行全面观测,取得了翔实的观测资料。在分析小流域降雨侵蚀及产沙规律的基础上,提出了小流域降雨侵蚀产沙模型,经福山、文登两个试验区资料检验,拟合精度较高,可以满足小流域河流产沙预测预报的要求。

## 1 小流域降雨侵蚀的试验观测

福山小流域设立以下观测试验项目:(1)降雨量观测。小流域内均匀布设 4 处雨量观测点,各点有自记雨量计和普通雨量器各一套;(2)流量测验。共设 5 处测流站,分别控制平原、丘陵山区及水库泄洪流量;(3)含沙量测验。重点是悬移质的观测,主要在行洪期与 1~5 号测流站流量测验同步进行,并计算出断面悬移质输沙量;(4)地下水位观测。共 24 眼基线井和断面井,进行日观测;(5)气象项目观测。气象场内除观测降水量外,还有水面蒸发量、气温、气压、湿度、地温、日照、风速、风向等观测;(6)淤积测量。包括水库淤积和河道冲淤测量,另外还有 20 处径流泥沙观察点的冲淤量调查。(7)试验小区观测。针对不同情况,共建林地荒坡、梯田及坡式梯田和草地三处试验小区,分别测土壤侵蚀量(悬移质、推移质)、土壤含水量、土壤容重、土壤养分流失量及土壤颗粒分析;(8)林区蒸发量观测。包括林区棵间的陆面蒸发(土壤蒸发、枯枝落叶层蒸发)和枝叶散发量,该小流域内仅进行枝叶散发量的简易观测。

## 2 山丘区小流域降雨侵蚀特征及时空分布

降雨侵蚀是雨滴击溅土面(溅蚀)和径流冲刷(冲蚀)及相互作用的复杂过程。溅蚀和冲蚀都能使土壤颗粒产生分离和搬运,小流域降雨侵蚀产沙量就是溅蚀和冲蚀共同作用下搬运到流域出口断面的泥沙量。

### 2.1 溅蚀和冲蚀

具有动能的雨滴降落时打击地表,不仅将地表土壤击实,还能使部分土粒分离,从而造成雨穴,在雨穴的边侧产生的侧压力也使其周围土粒剥落飞溅。产流前,雨滴击溅使土粒沿坡面发生迁移,但剥离及飞溅的土粒仍留在坡面,形成松散沉积物。随着降雨的继续,下渗能力减小,地表产生滞蓄水层,逐渐形成坡面径流。坡面滞蓄水层有保护表土减缓雨滴打击的作用,水层较薄时,较大雨滴仍能击穿它,溅起土粒,但此时雨滴动能的一部分耗于扰动水层,增大径流紊动,导致径流的挟沙能力变大;另一部分耗于击溅土壤表层,使土粒与土体分离。溅蚀为坡面径流输沙起到供沙的作用,然后由坡面径流携带至下游。雨滴溅蚀与坡面径流水深成负相关,随着坡面径流水深增大,雨滴击溅土层的能量将趋于零。相应的水流所吸收的雨滴动能不断增大,径流紊动强度也随之增加。

小流域内的冲蚀主要包括细沟、切沟和河道侵蚀。水流量和流速的增大使水流切入土壤能力增加,从而形成细沟。当坡面上的细沟合并,并向宽扩展,即形成深而边坡陡峭的切沟。河道侵蚀是因河水冲刷或因边坡不稳定而引起的土壤流失。不论是形成细沟还是形成切沟,基本上都依赖于土壤因子、水流速度和径流深。坡度增大,雨强增加,地表蓄水过多或在径流点发生下切等都会增大水力梯度。观测结果表明:无细沟山坡的产沙量比有细沟的山坡低得多。这是由于细沟内径流比细沟之间的水流具有更大的剥蚀能力。此外,细沟密度增大,细沟间溅蚀的土壤颗粒进入细沟的可能性变大,因而产沙量增加。

## 2.2 小流域降雨侵蚀的时空变化

小流域降雨侵蚀随时间的变化包括短时(单场暴雨)的、季节性的和长期的。季节性影响是最重要的周期性影响。对于单场暴雨侵蚀量的变化,我们对比分析了小流域几场暴雨的径流过程和悬移质浓度变化,悬移质峰值与流量峰值之间的关系大体一致。其中,刚产流时流量峰值滞后悬移质峰值的关系就是由产流前雨滴溅蚀造成的。之后,悬移质与径流过程的变化趋势基本一致。降雨侵蚀的季节性变化主要受制于气候及降雨的季节性变化,它又明显地影响着土壤、植被特征及总的水量平衡关系。降雨集中的地区,侵蚀亦主要集中在汛期,但由于植被生长滞后于年内的降雨过程,加上土壤含水量等因素的影响,同样的暴雨,汛初侵蚀量大于后期。

山丘区小流域是一个侵蚀、输移和产沙的独立单元。从山顶到山底平原,由于地貌类型、地形部位、坡度、坡向和土地利用的不同,降雨侵蚀方式和强度呈现出明显的垂直分带性。山顶及山前平原地面坡度较小,它的侵蚀产沙主要受控于击溅侵蚀,水流冲刷能力很弱,主要消耗于搬运已分散的土壤颗粒,径流量对侵蚀量影响不显著。丘陵下部一般是坡耕地和部分梯田,由于坡度增大,坡长增长,汇水面积增加,部分形成细沟侵蚀,这是坡耕地上产沙的主要侵蚀方式。但在降雨之初或短历时降雨时,溅蚀对产沙仍有较大影响。低山及丘陵上部多为荒芜坡地和坡耕地。由于坡度较大,坡面径流具有较大的冲刷能力,侵蚀方式由细沟进一步发展为浅沟侵蚀,并在沟缘线附近有切沟侵蚀发生。山丘区小流域的阳面由于日照时间长,太阳辐射强,土壤水分含量低,一般植被分布较差,因而侵蚀较阴面严重。

## 2.3 影响小流域降雨侵蚀的危险性因素

降雨侵蚀危险取决于下垫面因素和降雨侵蚀力。下垫面因素主要是土壤的抗蚀性、地貌形态、植被覆盖等。土壤的抗蚀性与土壤的物质成分、颗粒结构、有机质含量、植物根系、土壤或风化层厚度及土壤透水性等有关;地貌形态是影响侵蚀的重要因素,主要有坡度、坡长、坡向、沟谷密度、沟谷深度等;植被覆盖具有拦截雨滴、减弱雨滴对土壤的溅蚀和调节地表径流,减缓径流速率,分散径流,削减水流能量,减少地表冲刷及促进拦淤等作用。降雨是土壤水蚀的基本动力。影响侵蚀的降雨因素主要有降雨量、降雨强度、雨滴级配、雨型、降雨分布等。观测结果表明:降雨量大,侵蚀量亦大,但降雨量与土壤侵蚀量之间的直接关系并不明显,而相同雨量时,降雨强度和径流深度对降雨侵蚀影响却很大。所以降雨强度和径流深度在降雨侵蚀中起较大作用。

## 3 小流域降雨侵蚀产沙模型

河流泥沙来自于流域内各种形式的降雨侵蚀,在水力作用下产生的泥沙颗粒主要通过两种机制被输移;一是溅击机制;二是沟间范围内的径流输移机制。根据前面的分析,降雨侵蚀力是这两种机制的基本动力。因此采用复合结构 $\sum E^{\circ} I_{30}$ 计算降雨侵蚀力,即

$$R = \sum E^{\circ} I_{30} \quad (1)$$

式中: $\sum E$ ——一次降雨的总动能( $m^{\circ} t/hm^2$ ), $I_{30}$ ——一次降雨中最大 30min 的降雨强度( $cm/h$ )。上式反映了降雨击溅剥离和冲刷输移能力的组合。其中

$$E = e^{\circ} P \quad (2)$$

$$e = \begin{cases} 210.35 + 89.04 \log i & (i \leq 7.6 \text{ cm/h}) \\ 289 & (i > 7.6 \text{ cm/h}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $E$ ——一次降雨过程中某时段雨量的动能 ( $m^{\circ} t/hm^2$ );  $e$ ——单位降雨的动能 ( $m^{\circ} t/hm^2 \cdot cm$ );  $P$ ——某时段的降雨量 ( $cm$ );  $i$ ——单位降雨的降雨强度 ( $cm/h$ ) (1)式是侵蚀力  $R$  的经典算法,实际计算时较为麻烦,简易算法可参考文献 [1] 对一个特定流域而言,若非发生大的地壳运动或修建大型水利工程,它的地形、地貌、土壤、植被、农作物及耕作制度、人工水保措施等都是缓慢变化的,因此可用一个参数来综合表征流域的相对抗冲性指标,从而通用土壤流失方程<sup>[2]</sup>可做如下简化:

$$M = A^{\circ} R \quad (4)$$

式中:  $M$ ——土壤侵蚀模数;  $A$ ——表征坡面相对抗冲性的综合参数;  $R$ ——降雨侵蚀力。通过实测资料分析,我们发现  $M$  与  $R$  幂函数的相关关系较好。即下式:

$$M = A^{\circ} R^i \quad (5)$$

福山小流域 5 年 22 场次降雨和泥沙资料的  $M$  与  $R$  相关系数  $r = 0.99$ , 实测与计算结果见附表。

从附表可见,相对误差最大的是 1991 年唯一一次超过产沙雨强的降雨(第 17 场)。由于前期土壤缺水多,入渗大,地表径流小,因此实际产沙量比用公式计算的要小。第 20、21 场降雨的产沙量误差大致与此原因相同。而第 8 场降雨产沙量误差的原因却与此相反,此前较短时间内连续两次小强度降雨,土壤含水量较高,地表径流大,实际产沙量大于计算值。此外,我们还选用文登试验站 18 组降雨产沙资料,按 (5) 式做相关分析,其相关系数达 0.98

在实际计算中,忽略了我们认为不产生侵蚀的降雨。对于出现侵蚀的降雨来说,存在着一个起始降雨强度,即产沙雨强。把小于这一强度的降雨从计算中去掉,是为了使侵蚀力的计算更符合实际情况。因为无侵蚀的低强度降雨累加起来侵蚀力也会很大。

附表 福山小流域降雨侵蚀力及产沙量成果表

序 号	$R$	$M_{实}$	$M_{计}$	$M_{计} - M_{实}$
1	46.840	34.140	35.541	1.401
2	52.990	41.960	39.706	-2.254
3	19.960	15.010	16.517	1.507
4	6.100	6.440	5.694	-0.746
5	9.320	8.630	8.333	-0.297
6	23.460	21.170	19.097	-2.073
7	27.460	23.220	21.998	-1.222
8	7.840	8.910	7.134	-1.776
9	12.220	10.700	10.629	-0.071
10	19.460	16.810	16.145	-0.665
11	11.650	10.930	10.183	-0.747
12	7.210	6.420	6.617	0.197
13	16.700	17.070	14.072	-2.998
14	38.900	34.170	30.079	-4.091
15	7.250	6.110	6.650	0.540
16	58.050	49.500	43.096	-6.404
17	45.500	26.590	34.626	8.036
18	18.000	13.380	15.052	1.672
19	28.250	19.640	22.566	2.926
20	8.110	6.030	7.254	1.324
21	10.750	7.738	9.473	1.743
22	47.660	36.230	36.099	-0.131

## 4 结 语

(1) 降雨侵蚀是雨滴击溅和径流冲刷相互作用的结果, 只重视冲蚀形式的防护和治理是不够的, 还要注意控制雨滴击溅的侵蚀作用。此次我们注重观测和分析了降雨击溅侵蚀及其影响因素, 但限于观测试验和资料条件, 目前还难以定量表达溅蚀量及其过程。

(2) 本文提出的山丘区小流域降雨侵蚀产沙模型是在理论分析和统计分析的基础上建立的, 经福山、文登两个试验小流域的年、次降雨泥沙资料检验, 证明该模型可以较好地模拟河流产沙量, 实现了用侵蚀力因素推求流域产沙量的目的, 可以达到实用要求。若流域面积较大,  $R$  值空间分布的均匀性较差, 因此只适用于中小流域。此外, 由于该模型对下垫面因素考虑的比较少, 尤其是对地表产流影响较大的土壤含水量等因素的变化没有考虑, 造成部分模拟结果误差较大。另一方面, 若考虑因素太多, 势必造成应用的困难, 这也是制约成因模型发展的重要原因。

### 参 考 文 献

- 1 王万中等. 中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布. 水土保持学报, 1995, 9(4): 5~ 18
- 2 哈德逊 N W 著, 窦葆璋译. 土壤保持. 北京: 科学出版社, 1975

(上接第 10 页)

## 3 结 论

宁南地区土壤矿质元素的含量受母质和地貌影响较大, 且不同母质的元素受影响的方式和程度不同。

(1) 母质和地貌的差异对硅、铝、铁等元素影响甚微, 含量差异不很显著; 而对钙、镁等元素的影响较强烈, 含量差异显著。

(2) 钙、镁、钾等元素受淋溶和径流作用明显, 在残积母质和地貌高处, 淋溶减少, 含量降低; 在冲洪积母质和地形相对低洼处沉降富集, 含量增高。

(3) 铜、锌、锰等微量元素是较难风化和淋溶的元素, 在岩石风化和土壤形成过程中, 很少进入风化液和富集在较细的土粒, 随着细粒物质和易溶性元素的淋洗冲刷和迁移输出, 它们在地势较高和残积母质上相对富集, 形成残积母质 > 洪冲积母质 > 黄土母质; 山地 > 洪积扇 > 中下游阶地的分布规律。同时, 母质对锌、锰的影响比地形的影响显著。

(4) 土壤中硅、铝、铁含量主要受风化作用和成土过程的控制, 在成土环境稳定、发育时间长的熟土梯田、河流阶地等地区, 铁、铝含量增加, 硅则减少。同时, 该地区土壤的硅、铝、铁空间分布差异较小; 硅含量高, 铁铝含量低, 硅铝铁率很高, 即土壤风化发育程度低, 仍处在脱盐基的初级化学风化阶段。

### 参 考 文 献

- 1 唐丽华等. 黄壤中微量元素的含量和分布. 土壤学报, 1983, 20(2): 186~ 196
- 2 彭琳等. 黄土地区土壤中锌的含量分布、锌肥肥效及其有效施用条件. 土壤学报, 1983, 20(4): 361~ 372
- 3 沈碧贞等. 天津地区土壤中若干元素的含量与机械组成. 土壤学报, 1983, 20(4): 440~ 444