

降雨因素和坡度对片蚀影响的研究

刘 志 江忠善

(中国科学院 西北水土保持研究所·陕西杨陵·712100)
水 利 部

提 要

该文基于野外观测资料,分析探讨了天然降雨因素及地面坡度对片状侵蚀的影响。研究结果表明:反映降雨特性的指标 EI_{30} 和综合反映降雨和地形因子的指标径流势能 E_p 是影响片蚀显著的主要特征因子。通过分析,提出了具有物理概念的片蚀模型,这为进一步研究并建立坡面土壤侵蚀整体预报模型提供了片蚀建模的分析依据。

关键词: 降雨因素 径流势能 片蚀

Study on the Effect of Natural Rainfall Factors and Slopes on Sheet Erosion

Liu Zhi Jiang Zhongshan

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, Academia Sinica
and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract

This paper is based on the field observed data to study the effects of natural rainfall factors and slope steepness on sheet erosion. The results show that the index of EI_{30} (product of kinetic energy and maximum thirty-minute intensity of rainfall) which reflected the characteristics of rainfall and the potential energy of runoff which is a comprehensive index of including rainfall factors and topographical factors are important factors on affecting the sheet erosion. The sheet erosion models with clear physical conceptions are presented by analysing, and these can be provided analytical basis for establishing prediction models of soil erosion on sloping land.

Key Words rainfall factors potential energy of runoff sheet erosion.

片状侵蚀(Sheet erosion)是雨滴的分散作用和地表径流冲蚀作用,由径流携带分散土粒从地表均匀地流失的一种侵蚀方式,是土壤侵蚀的初期阶段。片蚀在部位分布上具有一定规律,主要发生在没有植被的坡耕地上,并且分布在细沟间地范围,又称为细沟间侵蚀(interrill erosion)。降雨、地形和植被因素是影响片蚀的主要外因,土壤的物理化学性质则是内因。对于特定的裸露地和土壤为一定时,片蚀的发生主要取决于降雨和地形因素。

以往国内外在片蚀研究方面,主要着重于降雨物理特性及其降雨侵蚀力对侵蚀影响作用方面,并在此方面取得了许多成果,但与细沟侵蚀难以区分进行单独试验,因而影响了研究的进展。目前美国正在研究建立基于侵蚀基本物理概念的取代通用土壤流失方程(USLE)的第二代水蚀

预报模型(WEPP),片蚀即细沟间侵蚀是该模型的主要组成部分。过去在黄土高原对片蚀定性研究方面比较多,但在定性与定量结合方面尤其径流侵蚀作用的研究工作进展比较缓慢。因此,除继续深入研究降雨因素外,径流侵蚀作用的研究就显得十分重要,这对于进一步揭示坡地水蚀过程和建立预报模型有重要的意义。

一、试验方法

本试验是在陕北安塞水土保持综合试验站土壤侵蚀试验场进行的,试验场内土壤为黄土母质性黄绵土。试验设计为两种处理:即 A 种处理(简称 AT)为每次降雨产流观测后松动表土(约 5cm)的裸露休闲地;B 种处理(简称 BT)为观测期间保持不松动表土的裸露休闲地。上述两种处理均在每年雨季前同时翻动表土层,并采用人工拔草方法,保持地面无值物生长状态。试验微小区坡度为 10°、15°、20°、25°、30°、35° 六级坡度,每级试验坡度布置上述两种处理微小区,每个微小区水平投影面积均为 1m²,微小区宽度皆为 0.6m。

试验观测项目有降雨过程(降雨量、降雨强度)、径流量、泥沙量。降雨过程、径流量和泥沙量皆采用常用方法测定,在此不再介绍。下面主要基于 1985~1987 年 3 年野外观测资料进行降雨因素和坡度对片蚀影响的分析研究。

二、结果与讨论

(一)降雨径流因素对片蚀的影响

降雨和径流因素是坡地水流片蚀的主要外营力。大量实测资料研究结果表明:在天然降雨条件下,土壤侵蚀量与次降雨量之间的直接关系并不密切;与平均雨强的关系有些提高,但不够理想;而与反映降雨集中程度的短历时最大雨强的关系最为密切。我们知道,降雨强度与降雨动能有密切关系,因此按照降雨过程逐段计算得到的次降雨总动能也间接地综合反映了降雨量和降雨强度两者对片蚀的影响。本文采用江忠善建立的黄土高原经验公式来计算次降雨总动能^[1]。

径流势能是造成坡面土壤侵蚀的另一个重要能量,主要起到冲蚀和搬运本身及雨滴分散泥沙的作用,它是随着降雨径流和地形发生变化的,可以从下面径流势能公式推导结果得以说明:

设径流深为 h 的水体平均分布坡面上,地表坡度为 θ ,取座标如图 1,当取 dy 对应水体为研究对象,这时微小水体的体积为 $dv = B \cdot h \cdot \text{ctg}(\theta) \cdot dy$,重量为 $dw = \rho \cdot g \cdot dv$,具有的势能为 $dEp = y \cdot dw$,所以将整个坡面上的微小水体具有的势能求和便是径流总势能 Ep ,因此在闭区间 $[0, H]$ 上积分便得 Ep :

$$Ep = \int_0^H dEp = \int_0^H \rho \cdot g \cdot B \cdot h \cdot \text{ctg}(\theta) \cdot y \cdot dy = \rho \cdot g \cdot B \cdot h \cdot H^2 \cdot \text{ctg}(\theta) / 2 \quad (1)$$

式中: Ep 为坡面径流势能(J); ρ 为水的密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); B 为坡面宽度(m); h 为水平面上径流深(m),它是平均径流系数(η)和平均降雨量(p, mm)的函数,即 $h = \eta p$; H 为坡面高度(m),它是坡长水平投影长度(L, m)和地表坡度($\theta, ^\circ$)的函数,即 $H = L \cdot \tan(\theta)$ (m)。

因此式(1)可变为:

$$Ep = \rho \cdot g \cdot B \cdot \eta \cdot p \cdot L^2 \cdot \tan(\theta) / 2 \quad (2)$$

由式(2)可以看出,坡面上的径流势能是地表径流深、坡长的平方和坡面倾角的正切的函数,而径流深与降雨量、降雨强度入渗量和坡面倾角都有密切的关系,因此具有明确物理概念的径流

势能公式概括了各种主要因素的影响。

通过能量侵蚀做功的关系, 可以分析降雨动能 E 和综合反映径流及地形因子的径流势能 E_p 对坡面片蚀的影响, 从而定量评价降雨、径流及坡度因素对片蚀的影响。单次降雨坡面单位面积的片蚀量 A 可表示为: $A = f(E, E_{pu}, k) = f(I, p, h, \theta, k)$, 因此以影响坡面片蚀的动力因子 (E, E_{pu}) 分析得到的结果, 实际上是各因子综合作用的结果。下面采用幂乘函数回归分析, 即:

$$A = ak(E)^m(E_{pu})^n \quad (3)$$

式中: A 为单次降雨片蚀量 (g/m^2); k 为反映土壤易蚀性效应因子; E 为次降雨动能 (J/m^2); E_{pu} 为单位面积径流势能 (J/m^2); α, m, n 为方程待定系数。根据 $10^\circ \sim 35^\circ$ 级坡度小区实测的 198 个样本资料, 经回归分析结果为:

$$AT: A = 10.1432(E_{pu})^{1.290} \quad (4)$$

$$R = 0.866 \quad F = 125.3^{**} \quad F_2 = 111.8^{**}$$

$$BT: A = 1.0931(E)^{0.39}(E_{pu})^{0.812} \quad (5)$$

$$R = 0.792 \quad F = 63.3^{**} \quad F_1 = 3.3^* \quad F_2 = 48.6^{**}$$

由分析模型和结果可知, 经 F 检验结果 ($F_2 > F_1$) 说明片蚀受径流势能影响比较大。我们知道, 水蚀的产生与发展是降雨径流侵蚀力与坡面土壤抗蚀力相互作用的结果。而且, 在侵蚀过程中雨滴能量和径流势能这两种能量的侵蚀机理和搬运过程是不相同的, 降雨动能起的主要作用是分散土粒和打击扰动地表水流。所以在 A、B 的两种不同地表处理的条件下, 能量有效侵蚀做功各不相同, 因而对片蚀的影响亦不相同。松动表土处理条件下, 相关方程式中降雨动能的指数接近零。这是由于松动表土后破坏了前期结皮, 降低了紧实程度, 因此减小了表土抗溅蚀性, 降雨动能所起的分散土粒作用, 常使地表水体含沙量很快地趋于坡面薄层水流挟沙能力的临界状态, 此时土壤流失量的大小, 主要取决于片状径流势能的搬运能力而不受供沙条件的限制, 因而径流势能的作用特别显著, 即属于搬运限制相侵蚀; 不松动表土处理, 由于降雨前此处理地表紧实, 增大了抗侵蚀性, 使降雨动能的分散作用和径流势能的冲刷作用降低, 此时的土壤流失量取决于两者提供可输移的分散量的多少, 即属于侵蚀限制相输移。

关于降雨侵蚀力指标 EI_{30} (降雨动能与最大 30min 雨强乘积) 与侵蚀量的关系, 我们已在另一篇文章中有过讨论^[2]。对于 EI_{30} 和径流势能 E_{pu} 对坡面片蚀的影响, 采用下面分析数学模型:

$$A = \beta k(EI_{30})^b(E_{pu})^c \quad (6)$$

式中: I_{30} 为最大 30min 雨强 (mm/min); 其余各符号的意义同前。分析结果见表 1。

表 1 AT、BT 处理 $10^\circ \sim 35^\circ$ 片蚀量 A 与 EI_{30} 、 E_{pu} 相关分析结果 (198 个样本)

处理	方程中系数及显著检验						
	βk	b	c	F	F_1	F_2	R
AT	0.5437	0.977	0.593	205.92	70.66	31.44	0.908
BT	0.7428	0.943	0.278	132.44	88.62	7.46	0.871

从表 1 可以看出, 在 AT、BT 的两种不同处理条件下, 片蚀量与降雨侵蚀力指标和径流势能之

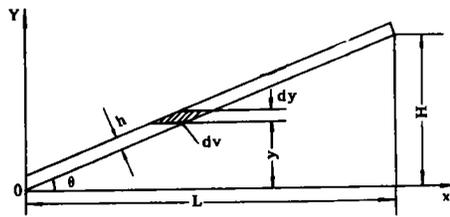


图 1 径流势能推导示意图

间的相关均在 0.01 水平上显著(两种处理中的 $F > F_{0.01}(2, 195) = 4.71$),同时也清楚看出 $E_{I_{30}}$ 对片蚀量 A 的贡献大于 E_{pu} ,即 AT 处理 $F_1 > F_2$ 和 BT 处理的 $F_1 > F_2$,说明降雨侵蚀力指标 $E_{I_{30}}$ 对片蚀量的影响比径流势能 E_{pu} 的作用大,主要是 I_{30} 综合了降雨径流对侵蚀的强烈影响所致,因而使影响片蚀量的降雨侵蚀力指标 $E_{I_{30}}$ 处于主导地位。

(二)地面坡度对片蚀的影响

地面坡度是地形因素中的对坡面土壤侵蚀的演变发展过程与侵蚀强度起重要作用的因子。对坡面水蚀来讲,坡面水流具有的侵蚀能量(动能),是水流的质量与其流速的函数;而水流的流速的大小主要取决于径流深和地表坡度。因此,坡度的大小,决定径流的冲刷与搬运能力。与此同时,地面坡度的大小影响降雨入渗量、地表径流量、地表滞水能力和侵蚀泥沙的稳定性,这些都直接或间接地影响了片蚀。根据观测数据分析,地面坡度与片蚀量密切相关,采用回归模型为:

$$G_0 = K_1\theta^2 + K_2\theta + K_0 \quad (7)$$

式中: G_0 为年均片蚀量(g/m^2); θ 为地面坡度($^\circ$); K_0, K_1, K_2 为方程系数。

表 2 AT、BT 处理年平均片蚀量 G_0 与地表坡度相关结果

处理	K_1	K_2	K_0	R
AT	-12.56	762.43	-3991.90	0.982
BT	-2.03	154.07	214.67	0.968

分析计算结果见表 2 及图 2(在 0.01 水平上显著)。从图 2 可以看出,两种处理在相同降雨和相同坡度条件下,AT 的片蚀量大于 BT 的片蚀量,这说明松动表土处理后使表土疏松,降低了土壤抗侵蚀性,在随坡度增大的条件下,颗粒的不稳定性亦增大,在降雨动能和径流势能的作用下更易发生水土流失且土壤侵蚀严重;而变对土壤侵蚀不利因素(降雨动能)为有利因素(利用雨滴打击作用使地表结皮、紧实的 BT 大大减少了土壤片蚀量,这为采用退耕、免耕和少耕方法来控制土壤流失提供了理论依据。

同时,从图 2 的曲线变化曲率可以看出,试验坡度各段的片蚀量变化速率各不相同,因此由式(7)和表 2 的结果,求出试验坡度变化范围的片蚀量增加速率(表 3)。从表 3 可以清楚地看出,AT、BT 均在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 范围内片蚀量增加速率最大,说明在此坡度范围内,尽管片蚀量不大但强度急剧增大,是值得注意的坡度。

另外根据回归线型可知,两种处理均存在侵蚀量随坡度变化的最大值,这个最大值对应的坡度值便是它的转折坡度值。因此,可以求出两种处理的坡度转折值,AT、BT 分别为 30.4° 和 37.9° 。关于转折坡度许多学者从不同学科对其机理进行了探讨和解释,但各家得出的转折坡度值差别很大,著名泥沙专家钱宁根据坡面水流

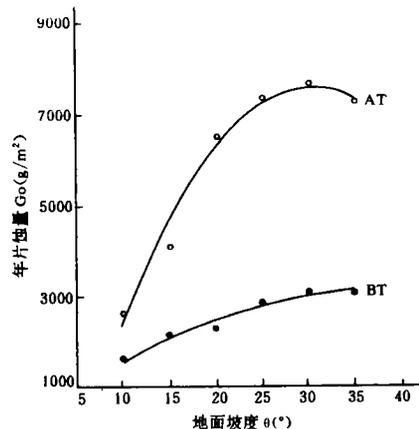


图 2 AT、BT 的年均片蚀量与坡度关系

表 3 AT、BT 试验坡度各段的片蚀量增加速率($g/m^2/^\circ$)

处理	$10^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 20^\circ$	$20^\circ \sim 25^\circ$	$25^\circ \sim 30^\circ$	$30^\circ \sim 35^\circ$
AT	448.43	322.83	197.23	71.63	-53.97
BT	103.32	83.02	62.72	42.42	22.12

切应力公式推导出的最大切应力转折坡度值为 40° ; 陈永宗、曹银真根据黄土高原绥德、离石两站 (下转第 61 页)

致富,关系子孙后代幸福的基础工程。

四、几点建议

1. 水土流失的防治工作,应在预防、监督、监测方面从上到下建立专门的办事机构和执法队伍及监测网络,使水土保持工作真正纳入规范化、法制化和科学、系统化的轨道。

2. 目前,基层从事水土保持工作的大部分人员,存在业务素质低的问题,希望上级主管部门组织培训学习,以提高在职人员的业务水平。

3. 水土保持监测工作是一项周期长、出成果慢的工作。但是,它是一项十分重要的工作,是有效地进行综合治理和效益分析,提供科学技术依据的基础工作。因此,为了更好地完成该项工作,适应国家监测网络建设的需要,建议从国家、地方投入的防治水土流失资金中,专门划拨一部分,作为开展该项工作的所需经费。

(上接第22页)

的径流小区资料统计得到的转折坡度为 $28^{\circ[3]}$ 和 $26^{\circ[4]}$; 国外一些学者也有过土壤侵蚀转折坡度的报导。我们以往的研究结果还表明,临界坡度不是一个固定值,其值且随着降雨及下垫面条件的不同而发生变化。总之,地面坡度对片蚀的影响是非常显著的,它的递增并非使片蚀量始终随其增大而存在着转折坡度,且在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 片蚀速率急剧加大,这对防治土壤侵蚀和治坡水土保持措施优化配置具有直接的指导意义。

三、结 论

1. 综合反映径流和地形因素的径流势能 E_p 对片蚀的作用大于降雨动能 E 的作用, EI_{30} 在片蚀中的作用地位的提高,主要是 I_{30} 的介入,为片蚀模型的发展及参变量的选择提供了分析依据;

2. 探讨了片蚀存在临界坡度问题,提出了不同处理条件下的片蚀数学模型,为进一步建立坡面土壤侵蚀整体预报模型提供了子模型和参数及分析依据;

3. 雨季减少翻耕(保持裸露休闲状态)地块,在降雨雨滴打击和其它因素作用下形成表土结皮,增大了表土的紧实度,对片蚀的发生发展起到明显抑制作用,这为指导生产实践(减少雨季表土扰动)和退耕(保持休闲)来防治土壤侵蚀有重要的意义和提供了理论依据。

目前,许多国家的学者十分重视从侵蚀物理成因出发,通过野外定位观测试验与模拟人工降雨试验的结合手段来研究土壤侵蚀过程和发展预报模型。因此,进行野外定位试验是土壤侵蚀研究的一个重要方面。在上述基础上探讨既具有实用性又有较明确的物理意义的片蚀预报模型,对深入研究坡地土壤侵蚀过程和数学建模是具有科学价值的。

参 考 文 献

- [1] 江忠善等. 黄土地区天然降雨雨滴特性研究.《中国水土保持》,1983年,第3期
- [2] Jiang Zhongshan and Liu Zhi, "Effect of Natural Raindrop Impact on Loess Crust, Infiltration, and Erosion", Proceedings of the 1th International Symposium on River Sedimentation, China Ocean Press, 1989(1): 74-81
- [3] 陈永宗等. 黄土高原现代侵蚀与治理. 北京: 科学出版社, 1988年
- [4] 曹银真. 黄土地区梁峁坡的坡地特征与土壤侵蚀.《地理研究》,1983年,第3期