

坡耕地施加 PAM 对土壤抗冲抗蚀能力影响试验研究

刘纪根¹, 雷廷武²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所; 2 中国科学院水利部水土保持研究所)

摘要: 提出了采用人工模拟降雨试验数据直接计算临界抗剪切应力的方法。该方法以水流动力学原理为基础, 通过观测到的初始坡面侵蚀发生位置、雨强、土壤入渗率及测定坡面的平均流速来计算土壤的临界抗剪切应力。通过不同试验条件, 分析了坡度、地表 PAM 处理对土壤临界抗剪切应力的影响。试验条件为: 雨强 100 mm/h, 3 种坡度: 10°、20°、25° (17.63%、36.4%、46.63%), 4 种 PAM 覆盖度: 40%、60%、80%、裸地。结果表明, 随着坡度的增加, 临界抗剪切应力减小; 随着 PAM 覆盖度的增加, 临界抗剪切应力相应增加。

关键词: 人工模拟降雨; 临界抗剪切应力; 坡度; PAM

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2002)06-0059-04

对于坡面流侵蚀的作用, 目前存在着不同的看法。一些学者将坡面流的侵蚀作用直接与水流的切应力联系起来, 认为坡面流侵蚀率与水流的切应力成正比。如 Horton (1945) 认为坡面侵蚀量取决于径流侵蚀力与土壤抗蚀力的相对关系。一些研究者认为: 当坡面径流侵蚀力大于土壤颗粒分散的临界切应力时, 土壤才会发生分散, 因此径流引起土壤分散率是径流底部切应力与土壤颗粒分散的临界切应力差值的函数。这概念对后来的坡面侵蚀研究者有很大的影响。Meyer W ischmeier (1975) 认为它们是幂函数, 而 Nearing (1989) 认为它们是线性函数。Foster^[1] (1981) 等人进一步研究指出: 只有在径流中的含沙量小于径流输沙力的条件下且当坡面径流侵蚀力大于土壤颗粒分散的临界切应力时才会有径流分散发生。其表达式为

$$D_r = D_0(1 - \frac{G}{T_c})$$

$$D_0 = K(\tau_f - \tau_c)$$

式中 D_r ——土壤分散率; D_0 ——水流分散能力; G ——水流实际输沙率; T_c ——径流输沙能力; τ_f ——作用在土壤颗粒上的切应力; τ_c ——土壤颗粒移动的临界切应力; K ——土壤可蚀性系数。

在计算预报坡面侵蚀量时, 确切的把握坡面侵蚀发生的临界状况十分必要, 不同的学者采用不同的指标, 除了径流切应力, 还有单位水流动力、单宽径流量及临界抗剪切应力。临界抗剪切应力是分析坡面水蚀过程、建立坡面水蚀模型的重要参数之一, 众多学者对其都作了比较详细的研究^[2~4]。其临界剪切应力大都是在采用冲刷水槽, 经过回归剥离与水流剪切力的试验数据分析得到的。用这种方法得到的临界抗剪切应力忽略了降雨的影响, 不能很好的模拟降雨侵蚀过程。

本研究通过模拟人工降雨, 观测发生侵蚀的临界坡长及此时的时间来确定一种直接估算临界剪切应力的方法。同时, 分析了施加 PAM 后的临界剪切应力的变化情况及其影响因素。

1 坡面侵蚀的基本理论

坡面土壤侵蚀的发生是坡面径流侵蚀力和土壤抗冲力相互作用的结果。当径流侵蚀力大于土壤抗冲力时, 发生坡面侵蚀^[5~7]。一定的土壤, 在一定的地形条件下, 其抗冲力基本保持一定, 这样坡面侵蚀发生所需的径流侵蚀力就有一个最小值问题。

降雨条件下, 当降雨强度大于土壤的入渗能力时, 坡面产生径流, 并且坡面水流从坡顶往下沿途不断有水流补给, 径流不断增加, 水流的冲刷能力逐渐加强^[8]。当坡面流在距坡顶一定距离 L 处时, 水流冲刷能力超过土壤抗剪能力时, 侵蚀发生。或者反过来说, 当坡面上某处开始有土壤侵蚀发生时, 即认为此处的水流冲刷力达到了土壤的临界抗剪切应力, 即用此时的水流冲刷力可以估计出土壤的临界抗剪切应力。

径流侵蚀力可用下式表示

$$\tau = \rho g \sin \theta h \quad (1)$$

式中 τ ——表示剪切力, Pa; ρ ——水的容重, kg/m^3 ; g ——重力加速度, 9.8 m/s^2 ; θ ——坡面倾斜度, ($^\circ$); h ——径流水深, m。

当在坡面上 L 处发生侵蚀时, 水流所具有的单宽流量为

$$q = \int_0^L (I - f) \cos \theta dx \quad (2)$$

式中 q ——单宽流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; I ——降雨强度, mm/m in ; f ——降雨入渗强度, mm/m in ; L ——发生侵蚀时的坡长, m, 对应于临界抗剪切应力的坡长。

即 $q = (I - f)L \cos \theta$ (3)
设坡面流水深为 h , 则有

$$q = uh \quad (4)$$

由(3)式和(4)式则可得坡面流水深 h 为

$$h = (I - f)L \cos \theta / u \quad (5)$$

根据(5)式, 在雨强一定的坡面上, 只要测定发生

收稿日期: 2002-05-29

基金项目: 引进国外杰出人才资金、(内蒙) 山丘区雨水储蓄农业高效利用产业化示范工程项目资助

作者简介: 刘纪根(1975-), 男, 博士生, 主要从事土壤侵蚀方面的研究工作。北京朝阳区大屯路 917 大楼 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101。E-mail: Jigenliu@163.com



侵蚀时的坡长,估算此时土壤的入渗率,测定此时的流速,则可得到坡面流水深 h ,代入(1)式就可得到临界抗剪应力。

2 试验方法

试验采用中国科学院水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的双向对喷式人工模拟降雨装置,降雨过程由计算机系统自动控制,降雨高度14 m。试验降雨强度控制在100 mm/h。试验土槽长8 m,宽3 m,深0.3 m,坡度可在0~30°之间调整。试验采用10°、20°、25°(17.63%、36.4%、46.63%)3个坡度。试验时将3 m宽的土槽分为15个部分,每个小土槽PAM的覆盖度分别为0.40%、60%、80%,并设有1个麦草覆盖处理。试验设3个重复。因试验在室内进行,试验装备的限制,坡长这一因素不易改变,我们采用了当量坡长的方法,即在坡地的上方加入一定的水量(径流量)来代替坡长的影响。其具体做法是:根据8 m的坡长所产生的径流来确定坡上的供水流量。其代表的意义是,当一定坡长不产生可见的土壤侵蚀而只产生径流时,就意味着在这一坡长上产生的径流的能量尚不足使土壤由地表剥离而产生土壤侵蚀;土壤还可以承受更多的径流冲刷。将相当于当前的坡面径流量的水流引入上坡,即相当于在坡面的上方增加了一个与当前坡长及地表条件相当的坡面。这就是当量坡长的含义。为此我们将试验分为2个过程,先做8 m坡长的试验,然后根据8 m坡长所产生的径流来确定在上坡加入的水流量。为方便试验,我们先做8 m坡长、一种坡度、一种雨强的试验,得到径流量。然后分别在上坡加入1倍、2倍、4倍于坡面径流的水流量,并人工降雨,中间不换土。即在同一坡度、同一雨强、不同PAM覆盖度下,先进行8 m

坡长的降雨试验,然后进行当量坡长为16、24、40 m的降雨试验。供试土壤为安塞黄绵土,采用耕层(0~20 cm)土壤,颗粒组成为:砂粒(>0.05 mm)含量12.6%,粉粒(0.05~0.005 mm)占72.3%,粘粒(<0.005 mm)占15.1%,属轻质壤土。土壤有机质含量介于0.3%~0.45%之间。

试验前先将土壤风干,使土壤含水率均一。装土时先在土槽中装15 cm左右的沙子,上面盖一层沙布,再装20 cm左右的土,装土容重控制在 1.09 g/cm^3 左右,用以模拟耕层土壤。然后把与干土混合好的PAM,分段均匀撒在地表。撒施PAM时,在1 m长的坡段内,部分坡段撒施PAM,部分未撒施,撒施PAM坡段的长度占该1 m坡段的百分数为PAM覆盖度,按实验设计进行控制。麦草覆盖处理,以覆盖麦草后未见裸露地表为准。

试验前在各个小土槽的上、中、下分放雨量筒一个,标定每个土槽的实际雨强。试验中记录产流随时间的变化,即每隔3~5 min采一次样,记下采样时间及采样体积以此估算径流变化过程。同时记录发生明显坡面侵蚀时的时间及此时的坡长,并用颜料水测定此时的坡面平均流速。

3 结果分析

3.1 基本参数的确定

据室内试验观察,坡面产流后,由于地面微形态的影响,坡面流会很快汇集并以股流的形式向下流动。径流一经汇集,侵蚀力剧增,迅速下切地表,在坡面形成侵蚀沟。此时的坡长就为发生侵蚀的临界坡长。同时,用颜料水迅速测定此时的坡面平均流速。入渗率可根据降雨径流资料进行推算,其推算过程见文献[9]。故此,可确定各参数值列表1。从表中可以看出,其临界水深均不超过1 mm,临界剪切力均小于1.50 Pa。

表1 临界剪切力计算参数值

Table 1 Parameters of calculating critical shear stresses

坡度	PAM 覆盖度 /%	入渗率 f / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	临界坡长 L /m	临界单宽流量 q / $\text{m}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$	流速 u / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	临界水深 h /mm	临界剪切应力 τ /Pa
10°	80	1.13	35.00	1.11	0.35	0.87	1.48
	60	0.96	18.50	0.77	0.33	0.65	1.11
	40	0.91	10.80	0.48	0.30	0.44	0.75
	裸地(♀)	0.69	5.25	0.30	0.26	0.32	0.54
20°	80	1.09	9.25	0.30	0.30	0.28	0.94
	60	0.98	5.75	0.22	0.27	0.23	0.77
	40	0.92	2.55	0.11	0.21	0.14	0.47
	裸地(♀)	0.53	1.65	0.11	0.24	0.12	0.40
25°	80	0.93	4.70	0.19	0.33	0.16	0.66
	60	0.85	3.50	0.16	0.33	0.13	0.54
	40	0.77	2.00	0.10	0.30	0.09	0.37
	裸地(♀)	0.39	1.70	0.12	0.36	0.09	0.37

3.2 坡度对临界剪切力的影响

坡度对临界剪切力的影响一直是个有争议的问题。陆兆熊^[10]等人发现,土壤抗剪应力的时间变化主要取决于土壤含水量,抗剪应力的空间变化与土壤条件

有关,缓坡的土壤抗剪应力高于陡坡。其变化关系为

$$\tau = ae^{-b\theta} \quad (6)$$

式中 τ ——土壤抗剪应力, kPa; θ ——坡度, (°); a, b ——常量, b 的变化范围为0.014~0.017。

蔡强国^[11] 等曾就细沟发生的临界坡度与土壤抗剪力的各种组合进行了分析, 他认为细沟发生的临界坡度与临界抗剪力有如下关系

$$A_r = -16.16 + 2.84K_{ar} \quad (7)$$

式中 A_r ——细沟发生的临界坡度, ($^\circ$); K_{ar} ——临界土壤抗剪力, kPa。雷廷武^[4] 等通过测定疏松土壤上细沟发生和停止时临界流量, 计算出临界剪切应力与坡度的关系

$$\tau_c = A + BS \quad (8)$$

式中 τ_c ——临界剪切应力, Pa; S ——坡度, %; A , B ——回归系数, 他通过回归试验数据表明, $A = 0$, $B > 0$, 即随着坡度的增加, 临界剪切应力也增加。本研究表明, 随着坡度的增加, 临界剪切应力减小。作者认为, 这是因为坡面上的固体物质重力可以分解为平行于坡面的下滑力和垂直于斜面的正压力, 坡度越陡, 下滑力就越大, 坡面固体物质就越不稳定, 更易被水流推移。另一方面, 坡度增加, 单位面积雨滴打击减少, 随坡度增加打击力的法向分力减少; 缓坡表面经常保持薄层水流, 使得雨滴对表土的压实力增加, 从而在陡坡上的结皮发育比缓坡弱。所以, 随着坡度的增加, 土壤的临界抗剪力减小。随着坡度的增加, 入渗量减小, 径流量和流速增加, 对土壤的侵蚀力增强。随着坡度的增加, 土壤颗粒的固有重力将有利于向下坡运动, 同时, 坡度的增加, 降低了土壤的稳定性。从表 1 可看出, 随着坡度的增加, 其临界坡长、临界水深、临界剪切力都随之减小。从表观上讲, 坡度增加, 临界剪切力也应该减小, 但其内在机理有

待进一步的研究。

3.3 施加 PAM 对临界剪切力的影响

PAM 作为一种新型土壤结构改良剂, 很早就受到人们的注意。国际上不同地区的研究表明, 对于特定的土壤, 用恰当的 PAM 作为土壤结构改良剂或稳定剂, 可以增加表层土壤颗粒之间的凝聚力, 维护良好的地表土壤结构, 防止土壤结皮, 增加土壤的入渗率, 减少地表径流, 从而可以防止或大大减少土壤侵蚀^[12]。杜尧东等研究发现, 在坡地施用 PAM 后可以减小地表径流, 提高土壤含水量, 促进土壤沉降, 增强土壤结构性和水稳性, 因而提高了土壤的持水性和抗冲性, 减小了土壤侵蚀量和肥力流失量, 有利于作物增产^[13]。从表 1 中可以看出, 覆盖 PAM, 其临界坡长、临界水深及临界剪切力均提高; PAM 覆盖度越大, 临界坡长、临界水深及临界剪切力也越大。覆盖 PAM, 其阴离子增加了土壤的阳离子代换量, 增强水稳性团聚体的凝聚和悬浮能力; 其强劲的胶结能力使降雨或径流对土粒的分离能力得到减小, 保持了土壤的团聚体, 减小结皮的形成, 维持良好的孔隙状况, 增加入渗, 减小径流, 从而减小侵蚀含沙量^[12, 14]。为更直观的表现不同坡度, 不同 PAM 覆盖度下临界水深及临界剪切力的变化情况, 将其绘制如图 1。从图 1 中可以看出, 坡度、PAM 覆盖度对临界水深和临界剪切力都有着显著的影响, 但其作用大小及其交互作用还有待进一步研究。同时, 本文只分析了一种雨强下黄绵土临界剪切力随坡度、PAM 覆盖度的变化情况, 在不同雨强、不同土壤下其变化规律也需更深的研究。

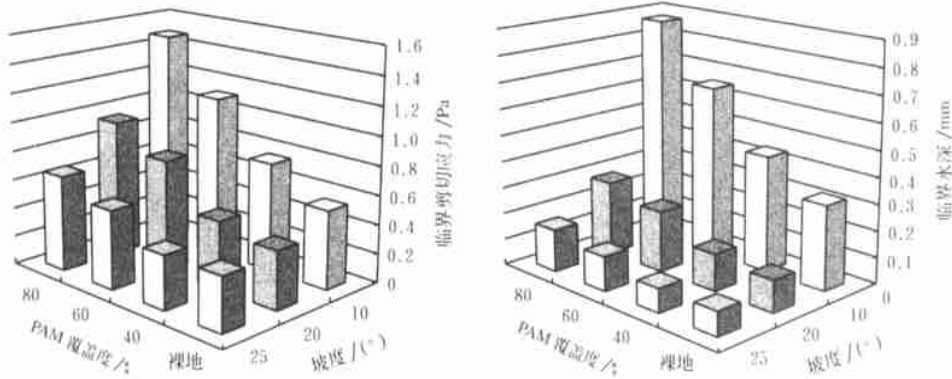


图 1 临界剪切力及临界水深随坡度、PAM 覆盖度变化

Fig. 1 Critical shear stresses and critical water depth vs slope gradients and PAM coverage

4 结论

本文通过模拟人工降雨, 通过观测发生明显侵蚀的临界坡长及此时的时间, 提出了一种直接计算临界水深及临界剪切应力的方法。分析了坡度、PAM 覆盖度对临界剪切力的影响, 得出了一些有意义的结论。

1) 坡度增加, 临界水深及临界剪切力随之减小。

2) 覆盖 PAM, 加大了临界水深及临界剪切力; 且随着 PAM 覆盖度的增加, 临界水深及临界剪切力也随之增加。

[参 考 文 献]

- [1] Foster G R, Lane L J, Nowlin J D, et al Estimating erosion and sediment yield on field sized areas[J]. Trans of the ASAE, 1981, 24(5): 1253~ 1262
- [2] Gilley J E, Laflen W J, et al Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling [J]. J of Hydrology, 1993, 142: 251~ 271
- [3] 张科利, 唐克丽 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 9~ 15
- [4] 雷廷武, Nearing M A. 水流作用下疏松材料中细沟的再

- 生及其临界剪应力的实验研究[J] 农业工程学报, 2000, 16(1): 26~ 30
- [5] 张科利, 唐克丽, 王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征值的研究[J] 水土保持学报, 1991, 5(2): 8~ 13
- [6] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J] 土壤学报, 1989, 26(2): 109~ 116
- [7] 张科利, 秋吉康宏. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J] 水土保持学报, 1998, 4(1): 41~ 46
- [8] 罗 斌, 陈 强, 黄少强. 南方花岗岩地区坡面侵蚀临界坡度探讨[J] 水土保持学报, 1999, 5(6): 67~ 70
- [9] 刘纪根, 雷廷武, 夏卫生等. 施加 PAM 的坡地降雨入渗过程及模型研究[J] 水土保持学报, 2001, 15(4): 51~ 54
- [10] 陆兆熊, 陈 浩等. 黄土抗溅力及可蚀性的时空变化规律 [C] 晋西黄土高原土壤侵蚀规律研究文集. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [11] 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
- [12] Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration [J]. Soil Science, 1994, 158(4): 274~ 282
- [13] 杜尧东, 夏海江, 刘作新等. 聚丙烯酰胺防治坡地水土流失试验研究[J] 水土保持学报, 2000, 14(3): 10~ 13
- [14] Sojka R E, Lentz R D, Westermann D T. Water and erosion with multiple applications of Polycrylamide in furrow irrigation[J] Soil Sci Soc Am J, 1998, 62: 1672~ 1680

Experiment Research on the Effect of Surface PAM Coverage on Erosion Soil Critical Shear Stresses of Slope Cultivated Land by Rainfall

Liu Jigen¹, Lei Tingwu²

(1. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: A direct calculation method of the critical shear stresses was established according to experiment datum on simulated rainfall. Based on the principle of hydraulics, through observing the initial place of slope erosion, rainfall intensity, soil infiltration rate, and the average velocity of slope flow, the critical shear stresses were calculated. At the same time, effects of slope degree and PAM coverage on the critical shear stresses were analyzed. The experiment was designed to have 1 level of rain intensity: 100 mm/h, 3 slope degrees: 10°, 20° and 25° (17.63%, 36.4% and 46.63%), and 4 treatments: control, 3 PAM coverage 40%, 60% and 80%. The results show that the critical shear stresses decline with slope degree increase; and the critical shear stresses increase with PAM coverage increase.

Key words: simulating rainfall; the critical shear stresses; slope degree; PAM