

文章编号: 1000-0887(2001)05-0449-09

坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析^{*}

刘青泉, 陈力, 李家春

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

(本刊编委李家春来稿)

摘要: 在运动波理论基础上, 就影响土壤侵蚀的主要因素, 包括降雨超渗净雨量, 坡面流水深、流速和切应力, 以及土壤抗冲蚀能力等随坡度的变化关系进行了理论分析。并进一步对坡面土壤侵蚀的坡度界限做了较细致分析, 表明坡度界限是一个变量, 随颗粒粒径、容重、坡面糙率、径流长度、降雨入渗差值(净雨量), 以及土壤摩擦系数等因素的不同而改变, 给出了界限坡度的变化规律, 并得出一般情况下土壤侵蚀的坡度界限值应在 $41.5^\circ \sim 50^\circ$ 范围内的结论。

关键词: 坡面; 土壤侵蚀; 坡度界限; 水流冲蚀力; 土壤稳定性
中图分类号: P333.5; O347.7; TU43; **文献标识码:** A

引 言

根据侵蚀动力的不同, 土壤侵蚀可分为多种侵蚀方式, 其中坡面流侵蚀(即降雨产生的坡面薄层水流对坡面土壤的冲蚀)是最普通的一种侵蚀方式。坡度是影响坡面流侵蚀的重要因素之一, 同样的降雨条件下, 坡度不同, 形成的坡面流有很大不同, 产生的土壤流失程度也有较大差别, 探讨坡度与坡面土壤侵蚀之间的关系, 对土壤侵蚀预报和水土保持规划都具有重要意义。过去不少学者对该问题做了许多研究工作, 但由于问题比较复杂, 研究的角度、对象不同, 得到的结果也有较大差异。概括起来主要有三方面的差异:

1) 得到的规律不同。如 Zingg 早在 1940 年就通过总结实测资料, 得到一个土壤侵蚀量与坡度之间的经验关系式^[1], $y = ax^b$, a, b 分别为正系数(取 0.065)和指数(取 1.48), x 表示坡度, y 表示土壤侵蚀量; 表明土壤侵蚀量随坡度的增大而增大。汤立群和陈国祥在小流域产流产沙模型中^[2], 建立的坡面土壤侵蚀量关系式, 也表明土壤侵蚀量与坡面的坡度成正比关系。但更多的野外实测资料和室内人工降雨试验资料表明, 土壤侵蚀量随坡度增大而增大的规律仅在一定范围内成立, 当坡度超过一定限度时, 侵蚀量与坡度又成反比关系, 说明土壤侵蚀存在着坡度界限。如 Yaur 和 Kleiu^[3]发现在一定坡度的坡面上泥沙输移量与坡度出现反比关系。

2) 得到的坡度界限有较大差异。如 Renner 在分析爱达荷洲博伊斯河流域的野外资料时得到, 坡地受侵蚀的面积百分数随坡度而异, 当坡度超过 40.5° 时侵蚀量反而随坡度增大而

* 收稿日期: 2000_05_16; 修订日期: 2000_02_03

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(19832060); 土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室基金资助项目

作者简介: 刘青泉(1965—), 男, 山西新绛人, 副研究员, 博士. E-mail: qqliu@mail.imech.ac.cn.

减小^[4]。陈法扬^[5]采用人工降雨在一面积为 6m^2 的可调坡木盒内进行实验研究,土壤为发育于第四纪红粘土,在土壤裸露,控制雨强不变的条件下,进行了 9 组实验,得到土壤侵蚀的坡度界限为 25° 。而在 Horton 的分析^[6]中,得到的坡度界限为 57° 。

3) 建立的土壤侵蚀率与坡度之间的定量关系式也有较大差异。如 Singer 和 Blackard^[7]采用两种土壤研究,研究坡度从 $3\% \sim 50\%$ 的细沟间侵蚀,得到土壤侵蚀量与坡角之间的二次多项式关系,对于粉沙质粘土有 $Dw = 0.22 + 9.37\sin Q - 8.43\sin^2 Q$,对于粘性土有 $Dw = -0.10 + 7.66\sin Q + 59.49\sin^2 Q - 101.65\sin^3 Q$ 的三次多项式关系,这里 Dw 是细沟间土壤流失量, Q 是坡度角。张科利和 K. Hosoyamada^[8]通过室内人工降雨试验,研究了不同坡度斜坡的产流产沙,也经验得到一个三次多项式关系 $S = 1.211 - 21.98\sin Q + 119.6\sin^2 Q - 178.9\sin^3 Q$,这里 S 为坡面土壤流失量, Q 是坡度角。

众多研究结果的差异,说明影响坡度与土壤侵蚀关系的因素十分复杂。因此,进一步细致地分析坡度对坡面土壤侵蚀的影响关系,对合理确定和预报坡面土壤流失十分重要。

1 坡面流侵蚀及主要影响因素

坡面流侵蚀是指降雨产流形成的薄层水流对坡面土壤的冲蚀过程。它的原动力是坡面水流的作用力,而它的抗冲能力则是土壤本身的稳定性。即坡面上的土壤流失主要是由于降雨产流对土壤的冲蚀作用大于土壤的抗冲蚀作用时,出现的土壤流失。可以将坡面土壤侵蚀概括为下面三步:首先当降雨强度超过地表洼蓄能力和土壤入渗率时,坡面开始出现积水,并在重力作用下顺坡面流动形成坡面薄层水流;而后,当坡面水流的冲蚀作用力大于土壤的抗冲能力时,土壤失稳,土粒开始被冲刷;最后被冲刷的沙土随坡面水流输运流失。因此,坡面土壤侵蚀率应正比于水流冲蚀作用(包括冲蚀力和输送能力)与土壤抗冲作用的对比关系。

假如用水流的底面切应力 τ_0 来表示水流的冲蚀能力,而用土壤沙粒的起动切应力 τ_c 来表示土壤的抗冲能力,则坡面土壤侵蚀率可以表达为^[2]:

$$E_s = A(\tau_0 - \tau_c)v, \quad (1)$$

式中: A 为适应系数,与泥沙密实干容重 γ_s ,浑水容重 γ_m ,土壤特性等因素有关; τ_0 、 τ_c 分别为水流切应力和坡面上泥沙起动切应力; v 为坡面径流平均速度。

在这个表达中,最主要的是水流的切应力 τ_0 和土壤的抗冲能力 τ_c ,以及坡面流速度 v 。说明坡面径流、土壤抗冲性是影响坡面土壤流失的主要因素。而坡度不同,同样降雨量条件下,产生的坡面径流(水流切应力和流速)也有较大的不同,土壤的抗冲性也有所不同,将会导致不同的坡面土壤流失率。

2 水流冲蚀力随坡度的变化

坡面流水深很小,坡面边界条件更是复杂多变,因此,对坡面流的描述一直是一个没有解决好的问题,一般仍采用一维浅水波(saint venant)方程组来模拟坡面水流^[9]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial x} = q^*, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + q^* \frac{v}{h} + g(S_f - S_0) = 0, \quad (3)$$

式中 t 为时间, x 为距离, h 为径流水深, v 为径流速度, q^* 为净雨量, S_0 为坡面坡度, S_f 为能坡或摩擦坡, g 为重力加速度。

在求解上式时, 一般可以采用运动波的近似假定。Wolhiser 和 Liggett^[10] 曾经对坡面一维非恒定渐变流进行分析, 一般当运动波数 $K > 20$ ($K = S_0L/h_0F_0^2$, 其中 S_0 为坡面坡度, L 为坡面流长度, h_0 为对应于坡面流长 L 处的水深, F_0 为相应的 Froude 数) 和 $F_0 > 0.5$ 时, 运动波模型可以很好地描述坡面流运动。对于大多数坡面流, 基本上均可满足此条件。因此, 我们采用运动波近似假定, 即水流的重力作用与阻力达到平衡, 则上述坡面流运动方程可以简化为:

$$S_f = S_0 = \sin\theta \tag{4}$$

我们曾采用运动波理论对 J. L. M. P. Lima 的室内人工降雨坡面产流试验过程^[11] 进行了数值模拟(试验参数: 土槽长 1m, 宽 0.5m, 深 0.8m, 坡度 10%; 降雨强度为 135mm/hr, 试验用土为 Limburg 土样, 试验历时 15min), 模拟计算结果与试验资料吻合良好(见图 1 所示)。可见, 运用运动波近似理论可以较好地模拟坡面降雨产流过程。

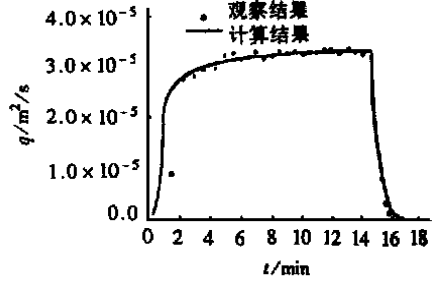


图 1 坡面产流过程模拟结果

2.1 坡面产流净雨量随坡度的变化

考虑超渗产流情况, 坡面产流多少取决于降雨强度和土壤入渗率的对比关系。对于一个水平面而言, 考虑垂直降雨, 如降雨强度为 I , 土壤的入渗率为 f , 则超渗净雨量为

$$q^* = I - f \tag{5}$$

对于斜坡地, 坡面与水平面存在一夹角 θ , 坡面与降雨方向也存在一个夹角 ($90^\circ - \theta$), 坡面的实际受雨面积将随坡度而变化。致使同一降雨强度下, 不同坡度的坡面, 其单位面积的实际受雨量不同。如图 2 所示, 对于坡度为 θ 角的坡面, 如坡面面积为 AC , 实际受雨面积则减小为 $AB = (AC \cos\theta)$, 即坡面上单位面积的实际受雨量随坡度的增大而减小。

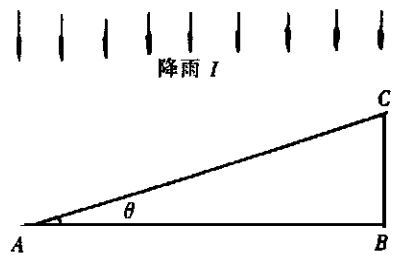


图 2 坡度与坡面实际受雨量的关系

当相对于水平面的降雨强度为 I 时(单位时间单位面积上的降雨量), 则对于坡度为 θ 的坡面, 单位面积单位时间的实际受雨量强度 I_0 为:

$$I_0 = I \cdot \cos\theta \tag{6}$$

而土壤的入渗率则不因坡度变化而改变, 因此, 坡面上的实际净雨量为

$$q^* = I_0 - f = I \cos\theta - f \tag{7}$$

说明降雨在单位面积单位时间产生的净雨量随坡度的增大而减小。

2.2 坡面径流水深随坡度的变化

坡面单宽径流量顺坡向下的增加率为 dq/dx , 则有

$$\frac{dq}{dx} = q^* = I \cos\theta - f \tag{8}$$

所以, 在均匀降雨条件下, 距离坡顶 L 处的单宽流量为:

$$q = \int_0^L \frac{dq}{dx} dx = (I \cos\theta - f) L \tag{9}$$

假设距离坡顶 L 处的径流水深为 h , 则同时有

$$q = vh \tag{10}$$

由此可得到

$$vh = (I \cos \theta - f)L \quad (11)$$

坡面流运动比较复杂,其阻力规律与传统的明渠水流阻力规律并不相同,但一般在实际应用中,为了简化问题,作为一种近似,目前仍采用一般明渠流阻力的概念和表达方法,即采用 Darcy_Weisbach 公式, Chezy 公式或 Manning 公式,这里我们借用明渠均匀流 Manning 阻力公式,则坡面径流长 L 处的坡面流平均速度 v 为:

$$v = \frac{1}{n} h^{2/3} \sin^{0.5} \theta \quad (12)$$

式中 n 为 Manning 糙率系数, θ 为坡面角度。

则可得到径流长 L 处的径流水深 h 为

$$h = \frac{[n(I \cos \theta - f)L]^{3/5}}{\sin^{0.3} \theta} \quad (13)$$

由于 $\cos \theta$ 随坡度 θ 的增大而减小,而 $\sin \theta$ 随坡度 θ 的增大而增大,由式(13)可知,坡面径流深 h 表现为随坡度增大而减小的变化规律。同时,式(13)也表明,坡面糙率、降雨强度、径流长度和土壤入渗率都对坡面径流深度有影响,一般径流深随坡面糙率、降雨强度和径流长度的增加而增大,随土壤入渗率的增大而减小。

2.3 坡面流速度随坡度的变化

仍采用明渠均匀流 Manning 阻力公式,则坡面径流长 L 处的坡面流平均速度

$$v = \frac{1}{n} h^{2/3} \sin^{0.5} \theta$$

将式(13)代入上式得:

$$v = \frac{1}{n} [n(I \cos \theta - f)L]^{2/5} \sin^{0.3} \theta \quad (14)$$

为简化分析,对式(7)进行分解

$$q^* = I \cos \theta - f = (I - f) \cos \theta - (1 - \cos \theta)f \quad (15)$$

对于一般的坡度(小于 45°), $1 - \cos \theta$ 比 $\cos \theta$ 小的多,同时对于所考虑的暴雨超渗产流情况,降雨强度远大于土壤入渗率,且入渗率随降雨时间逐渐减小直至饱和,即 $f \rightarrow 0$,所以上式中的第二项可以忽略,即有:

$$q^* = I_0 - f \approx (I - f) \cos \theta, \quad (16)$$

则式(14)简化为

$$v = \frac{1}{n} [n(I - f)L]^{2/5} \sin^{0.3} \theta \cos^{0.4} \theta \quad (17)$$

可见,坡面流流速与坡度具有复杂的关系,并且与坡面糙率、降雨强度、径流长度和土壤入渗率等因素有关,一般随降雨强度和径流长度的增加而增大,随坡面糙率、土壤入渗率的增大而减小。

上式对 θ 求导有

$$\frac{dv}{d\theta} = \frac{1}{n} [n(I - f)L]^{2/5} \frac{0.3 \cos^2 \theta - 0.4 \sin^2 \theta}{\sin^{0.7} \theta \cos^{0.6} \theta} \quad (18)$$

由 $dv/d\theta = 0$, 可得到出现坡面流流速最大值的坡度约为 40.9° 。即在 $0^\circ \sim 40.9^\circ$ 范围内,坡面流速度随坡度的增大而增大,在 40.9° 时,坡面流速最大。当坡度超过 40.9° 时,坡面流速度又随坡度的增大而减小。点绘 $v([n(I - f)L]^{2/5}/n)^{-1}$ 与坡度 θ 之间的关系如图 3 所示,同样清楚地表明了坡面径流速度随坡度的变化规律。

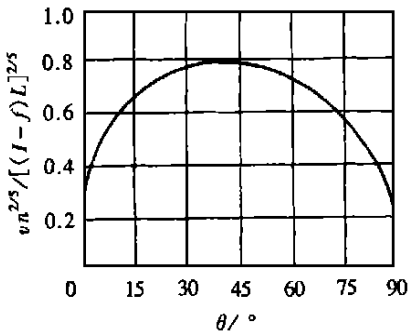


图3 $\frac{v}{[(n(I-f)L]^{2/5}/n}$ 与坡度 θ 的关系

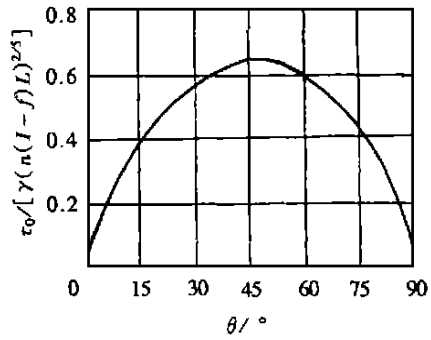


图4 $\frac{\tau_0}{\gamma[(n(I-f)L]^{3/5}}$ 与坡度 θ 的关系

2.4 坡面流冲刷能力随坡度的变化

采用运动波理论, 坡面流剪切应力 τ_0 为:

$$\tau_0 = \gamma h \sin \theta \tag{19}$$

结合式(13), 则有

$$\tau_0 = \gamma [n(I \cos \theta - f)L]^{3/5} \sin^{0.7} \theta \tag{20}$$

式(20)中, $\cos \theta$ 随坡度 θ 的增大而减小, 而 $\sin \theta$ 随坡度 θ 的增大而增大, 表明坡面流切应力随坡度的变化关系比较复杂。一方面, 坡面径流深随坡度的增大而减小, 另一方面, 坡面流的能坡却随坡度增大而增大。导致坡面流切应力随坡度的变化取决于二者变化大小的对比。

同样运用式(17)对式(20)进行简化, 有

$$\tau_0 = \gamma [n(I-f)L]^{3/5} \sin^{0.7} \theta \cos^{0.6} \theta \tag{21}$$

上式(21)对坡度 θ 求导得:

$$\frac{d\tau_0}{d\theta} = \gamma [n(I-f)L]^{3/5} \frac{0.7 \cos^2 \theta - 0.6 \sin^2 \theta}{\sin^{0.3} \theta \cos^{0.4} \theta} \tag{22}$$

由 $d\tau_0/d\theta = 0$, 可得坡面流切应力的最大值大约出现在 47.2° 左右。即在 $0 \sim 47.2^\circ$ 范围内, 坡面流冲刷能力随坡度的增大而增大, 当坡度超过 47.2° 时, 坡面流冲刷能力随坡度的增大反而减小。点绘 $\tau_0 / [\gamma [n(I-f)L]^{3/5}]$ 与坡度的变化关系如图4所示。清楚地表明了坡面流切应力随坡度的变化关系。

式(21)还表明, 坡面流冲刷能力还与坡面糙率、降雨强度、径流长度和土壤入渗率等因素有关, 一般随坡面糙率、降雨强度和径流长度的增加而增大, 随土壤入渗率的增大而减小。

3 土壤抗冲性随坡度的变化

土壤的抗冲蚀能力, 主要取决于土壤的性质, 植被覆盖情况和坡面的坡度等因素。实际问题中, 土壤性质和植被覆盖情况往往是十分复杂多变的。这里我们主要讨论坡面坡度对土壤抗冲蚀性的影响。为了简化问题的讨论, 可以将由于土壤特性的抗冲蚀作用主要概化为土壤的自然粘聚力 τ_1 , 植被覆盖的抗冲蚀作用概化为固结力 τ_2 , 且一般有:

$$\tau_1 = f(\text{土壤类型, 级配, 土壤中的化学成分, } \dots), \tag{23}$$

$$\tau_2 = f(\text{植被覆盖率, 植被类型, } \dots) \tag{24}$$

土壤本身的重力作用也是土壤稳定的重要因素。假设土壤颗粒的代表粒径为 d , 摩擦系数为 N_0 , 则对于水平情况, 由于土壤颗粒自身重力作用(一个颗粒直径范围内)的抗冲蚀摩擦

阻力为:

$$\tau_3 = N_0(\gamma_s - \gamma)d, \quad (25)$$

式中 γ_s 、 γ 分别为颗粒干容重和水容重。

对于坡度为 θ 角的坡面情况, 颗粒的重力作用可以分解为两个作用完全不同的力。垂直于坡面的作用力起到稳定颗粒的作用, 而平行于坡面的力则成为促使颗粒运动的作用力。垂直于坡面的重力产生的抗冲摩擦力为:

$$\tau_3 = N_0(\gamma_s - \gamma)d \cos \theta, \quad (26)$$

而平行于坡面的作用力为

$$F = (\gamma_s - \gamma)d \cos \theta. \quad (27)$$

综合上述各因素, 坡面上的土壤抗冲蚀力, 为:

$$\tau_c = \tau_1 + \tau_2 + (\gamma_s - \gamma)d(N_0 \cos \theta - \sin \theta). \quad (28)$$

$\cos \theta$ 随坡度 θ 的增大而减小, 而 $\sin \theta$ 随坡度 θ 的增大而增大, 表明坡面土壤抗冲蚀能力随坡度的增大而减小, 即土壤稳定性随坡面坡度的增大而逐渐减弱。同时式(28)还表明, 坡面土壤稳定性(抗冲蚀能力)还与土壤性质、植被覆盖情况、颗粒粒径等因素有关。

4 土壤侵蚀的坡度界限

许多人工降雨试验和野外观测资料都表明, 在一定的范围和条件下, 土壤侵蚀量与坡面的坡度成正比关系, 而在坡度超过一定限度后, 土壤侵蚀量与坡度成反比关系, 说明土壤侵蚀存在坡度界限。但由于影响坡度界限的因素比较复杂, 各研究者的研究方法和对象都不相同, 得到的坡度界限也有较大差异。如 Renner^[4] 在爱达荷洲博伊斯河流域得到的土壤侵蚀坡度界限为 40.5° , 陈法扬^[5] 采用人工降雨试验得到的土壤侵蚀坡度界限为 25° 。Horton 在 1945 年对土壤侵蚀坡度界限进行了理论分析^[6], 在不考虑土壤入渗的情况下, 从运动波假设出发, 分析了坡度变化与径流深的关系, 从而求得水流切应力随坡度的不同变化, 得到的坡度界限为 57° 。曹文洪^[12] 在此基础上, 进一步考虑了坡面糙率、土壤颗粒、降雨、入渗及径流长对坡面水流切应力的影响, 从理论上分析了坡面土壤侵蚀的界限坡度, 得到坡度界限还受到坡面糙率、土壤颗粒、降雨及入渗等因素的影响, 并非常数, 并得到坡度界限接近于 41° 。这些分析虽然都从理论上对问题进行了较好的描述。但都仅仅只考虑了水流的冲蚀能力, 而没有对土壤的抗冲蚀能力和水流输沙能力进行分析。事实上, 从上文的分析可以知道, 除了水流冲蚀能力随坡度变化外, 土抗冲蚀能力同样随坡度的变化而改变, 同时水流输运泥沙的速度 v 也随坡度而变化。因此分析土壤侵蚀应同时考虑这三个方面的影响。

根据上文分析, 坡面流剪切力 τ_0 、土壤抗冲力 τ_c , 以及坡面流速度 v 与坡度的关系分别为:

$$\begin{aligned} \tau_0 &= \gamma [n(I-f)L]^{3/5} \sin^{0.7} \theta \cos^{0.6} \theta, \\ \tau_c &= \tau_1 + \tau_2 + (\gamma_s - \gamma)d(N_0 \cos \theta - \sin \theta), \\ v &= \frac{1}{n} [n(I-f)L]^{2/5} \sin^{0.3} \theta \cos^{0.4} \theta. \end{aligned}$$

分析 I:

如果仅考虑坡面流剪切力和土壤抗冲蚀力的作用有:

$$E_s \propto \tau_0 - \tau_c$$

而

$$\begin{aligned} \tau_0 - \tau_c &= \gamma [n(I-f)L]^{3/5} \sin^{0.7} \theta \cos^{0.6} \theta - \\ &\tau_1 - \tau_2 - (\gamma_s - \gamma) d (N_0 \cos \theta - \sin \theta) \end{aligned} \quad (29)$$

上式对 θ 求导, 由 $d(\tau_0 - \tau_c)/d\theta = 0$, 可得到界限坡度 θ_m 有下列关系:

$$\frac{0.6 \sin^2 \theta_m - 0.7 \cos^2 \theta_m}{(\sin^{0.3} \theta_m - \cos^{0.4} \theta_m)(N_0 \sin \theta_m + \cos \theta_m)} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}} \quad (30)$$

则有:

$$\theta_m = F \left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}, d, n, I - f, L, N_0 \right] \quad (31)$$

可见, 坡面土壤侵蚀的界限坡度与颗粒粒径、容重、坡面糙率、径流长度、降雨入渗差值(净雨量), 以及土壤摩擦系数等因素都有关。即土壤侵蚀的界限坡度是一个变量。

当取摩擦系数 N_0 为 0.047 时, 可得到界限坡度 θ_m 与综合参数 $\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}}$ 的关系(如图 5(a) 所示)。可见, 对于土壤性质一定的坡面, 坡面糙率越大, 径流平衡距离越长, 以及净雨量越大, 则土壤侵蚀的界限坡度越小。

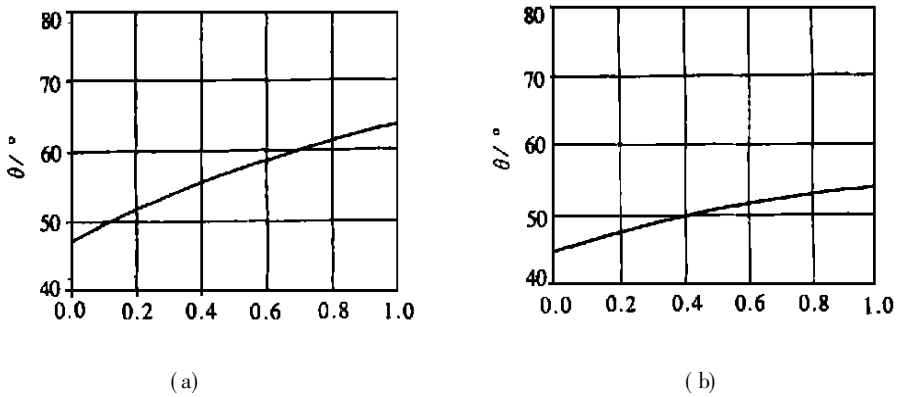


图 5 界限坡度 θ_m 与 $\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}}$ 的关系

分析 II:

同时考虑水流冲蚀能力 τ_0 , 土抗冲蚀能力 τ_c 和水流运输泥沙的速度 v 三个因素, 且忽略颗粒间的粘结力 τ_1 和植被覆盖的固结作用力 τ_2 , 则将 τ_0, τ_c, v 代入式(1), 化简得到坡面土壤侵蚀率为:

$$\begin{aligned} E_s &= A \gamma (I-f) L \sin \theta \cos \theta - \\ &\frac{d}{n} [n(I-f)L]^{2/5} (\gamma_s - \gamma) (N_0 \sin^{0.3} \theta \cos^{1.4} \theta - \sin^{1.3} \theta \cos^{0.4} \theta) \end{aligned} \quad (32)$$

上式结果表明, 影响坡面土壤侵蚀的因素十分复杂, 包括坡面坡度、颗粒粒径、容重、坡面糙率、径流平衡长度、降雨入渗差值(净雨量), 以及土壤摩擦系数等因素。坡度只是其中的主要影响因素之一, 而这正是不同学者由于研究的对象不同, 得到的结果具有较大差异的根本原因。

式(32)对 θ 求导, 由 $dE_s/d\theta = 0$, 可得到界限坡度 θ_m 有下列关系:

$$\frac{\sin^{0.7} \theta_m \cos^{0.6} \theta_m (\cos^2 \theta_m - \sin^2 \theta_m)}{N_0 \cos \theta_m (0.3 \cos^2 \theta_m - 1.4 \sin^2 \theta_m) - \sin \theta_m (1.3 \cos^2 \theta_m - 0.4 \sin^2 \theta_m)} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}} \quad (33)$$

同样有:

$$\theta_m = F \left[\frac{Y_s - Y}{Y}, d, n, I - f, L, N_0 \right] \cdot$$

即土壤侵蚀的界限坡度是一个变量,随颗粒粒径、容重、坡面糙度、径流长度、降雨入渗差值(净雨量),以及土壤摩擦系数等因素的不同而改变。

取摩擦系数 $N_0 = 0.047$, 可得到界限坡度 θ_m 与综合参数 $\frac{Y_s - Y}{Y} \frac{d}{[n(I - f)L]^{3/5}}$ 的关系(如图 5(b) 所示)。同样表明,对于土壤性质一定的坡面,坡面糙度越大,径流平衡距离越长,以及净雨量越大,则土壤侵蚀的界限坡度越小。

综合参数 $\frac{Y_s - Y}{Y} \frac{d}{[n(I - f)L]^{3/5}}$ 中,糙率 n 的单位取 $s/m^{1/3}$, $(I - f)$ 的单位取 m/s , 径流长 L 的单位取 m 。实际情况下,坡面糙率约为 $0.02 \sim 0.06$, 净雨量约为 $20\text{mm} \sim 100\text{mm/小时}$, 坡面长约 $20\text{m} \sim 100\text{m}$, 即 $\frac{Y_s - Y}{Y} \frac{d}{[n(I - f)L]^{3/5}}$ 值一般都比较小,约在 $0.03 \sim 0.3$ 范围内,因此,由图 5(a)、(b) 可知,坡面土壤侵蚀的界限坡度一般应在 $41.5^\circ \sim 50^\circ$ 的范围内。

5 结 论

1. 坡面流切应力、土壤的抗冲蚀能力和坡面流速度是决定坡面土壤侵蚀率的三个主要方面,而其中的影响因素众多,包括坡度、降雨强度、土壤入渗率、土壤特性、颗粒粒径、坡面糙率、植被覆盖,以及坡面径流平衡长度等。

2. 坡度是影响坡面产流及土壤侵蚀的重要因素,对降雨产生的净雨量、坡面径流水深、坡面流速度和坡面流切应力都有显著影响。一般净雨量和径流水深都随坡度的增大而减小;而坡面流速度首先随坡度增大而增大,当坡度增大到 40.9° 时,达到最大值,之后又随着坡度的增大而减小;坡面流切应力同样在小坡度时,随坡度的增大而增大,当坡度为 47.2° 时达到最大值,之后又随着坡度的增大而减小。

3. 土壤的抗冲蚀能力一般随着坡度的增大而减小。

4. 坡面土壤侵蚀具有坡度界限,且土壤侵蚀的界限坡度是一个变量,随颗粒粒径、容重、坡面糙率、径流长度、降雨入渗差值(净雨量),以及土壤摩擦系数等因素的不同而改变,但一般情况下土壤侵蚀的坡度界限应在 $41.5^\circ \sim 50^\circ$ 范围内。对于土壤性质一定的坡面,坡面糙率越大,径流平衡距离越长,以及净雨量越大,则土壤侵蚀的界限坡度越小。

[参 考 文 献]

- [1] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J]. Agric Eng, 1940, 21: 59—64.
- [2] 汤立群, 陈国祥. 小流域产流产沙动力学模型, 水动力学研究与进展, A 辑, 1997, 12(2): 164—174.
- [3] Yair A, Klein M. The influence of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in an arid area[J]. Catena, 1973, 1(1): 1—8.
- [4] Renner F G. Conditions influencing erosion of the boise river watershed[Z]. V S Dept Agric Tech Bull, 1936, 528.
- [5] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J]. 中国水土保持, 1985, (2): 24—30.
- [6] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology, Geol Soc Amer Bull, 1945, 56(3): 275—370.

- [7] Singer M J, Blackard J. Slope angle_interrill soil loss relationships for slopes up to 50% [J]. Soil Sci Soc Am J, 1982, 46(6): 1270—1273.
- [8] ZHANG Ke_li, Hosoyamada K. Influence of slope gradient on interrill erosion of shirasu soil phys[J]. Cond Plant Growth Jpn, 1996, (73): 37—44.
- [9] Emmett W W. Overland flow [A]. In: Kirkby M J Ed. Hillslope Hydrology [C]. John: Wileyand Sons, 1978.
- [10] Woolhiser D A, Liggett J A. Unsteady one_dimensional flow over a plane_the rising hydrograph[J]. Water Resoyr Res, 1967, 3(3): 753—771.
- [11] Lima J L M P. Model KININF for overland flow on pervious surface[A]. In: A J Parsons Ed. Overland Flow [C]. UCL Press, 1992.
- [12] 曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究[J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 1—5.

Influences of Slope Gradient on Soil Erosion

LIU Qing_quan, CHEN LI, LI Jia_chun

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, P R China)

Abstract: The main factors influencing soil erosion include the net rain excess, the water depth, the velocity, the shear stress of overland flows, and the erosion_resisting capacity of soil. The laws of these factors varying with the slope gradient were investigated by using the kinematic wave theory. Furthermore, the critical slope gradient of erosion was driven. The analysis shows that the critical slope gradient of soil erosion is dependent on grain size, soil bulk density, surface roughness, runoff length, net rain excess, and the friction coefficient of soil, etc. The critical slope gradient has been estimated theoretically with its range between 41.5° ~ 50° .

Key words: soil erosion; critical slope gradient; flow scouring capability; soil stability