

土壤侵蚀的坡度影响和坡面界限¹⁾

刘青泉 陈力 李家春

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

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 $45^\circ\sim 48^\circ$ 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

过去不少学者对该问题做了许多研究工作, 但由于问题复杂, 研究的角度和对象不同, 其结果也有较大差异: (1) 得到的规律不同。(2) 得到的坡度界限有较大差异。(3) 建立的土壤侵蚀率与坡度的定量关系也有较大差异。说明影响坡度与土壤侵蚀关系的因素十分复杂。从理论上深入分析坡度对土壤侵蚀的影响, 对合理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

坡面流冲蚀能力、土壤的抗冲蚀能力和坡面流速度 v 是决定坡面土壤侵蚀率的三个主要方面。用水流的底面切应力 τ_0 表示水流的冲蚀能力, 而用土壤沙粒的起动切应力 τ_c 表示土壤的抗冲能力, 则坡面土壤侵蚀率可以表达为

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

式中: A 为适应系数, 与泥沙密实干容重 ρ_s , 浑水容重 ρ_m , 土壤特性等因素有关。

影响坡面流速度、冲刷能力, 以及土壤抗冲蚀能力的因素众多, 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, 以及坡面径流平衡长度等。

2 水流冲蚀力及土壤抗冲性随坡度的变化

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强度 I_θ 为

$$I_\theta = I \cos \theta \quad (2)$$

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

$$q_* = I_\theta - f = I \cos \theta - f \quad (3)$$

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。

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

运用运动波理论, 并采用一般明渠流均匀流 Manning 阻力公式, 则有

$$S_f = S_0 = \sin \theta \quad (4)$$

$$\tau_0 = \gamma h \sin \theta \quad (5)$$

$$v = \frac{1}{n} h^{2/3} \sin^{0.5} \theta \quad (6)$$

由此对坡面流水深 h , 流速 v 和切应力 τ_0 等随坡度 θ 的变化关系进行理论分析, 分别得到各自与坡面坡度之间的理论关系

$$h = [n(I \cos \theta - f)L]^{3/5} / \sin^{0.3} \theta \quad (7)$$

$$v = \frac{1}{n} [n(I - f)L]^{2/5} \sin^{0.3} \theta \cos^{0.4} \theta \quad (8)$$

$$\tau_0 = \gamma [n(I - f)L]^{3/5} \sin^{0.7} \theta \cos^{0.6} \theta \quad (9)$$

可见, 一般坡面流水深随坡度的增大而减小。而坡面流流速、切应力与坡度具有复杂的关系。可分别绘制出坡面流流速、切应力随坡度变化的关系图(略)。表明二者均首先随坡度增大而增大, 增大到一定值后, 又随坡度的增大而减小; 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。

由式(8), (9)分别对 θ 求导取极值, 可得到坡面流流速和切应力出现最大值的相应坡度分别约为 40.9° 和 47.2° 。

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坡度等因素。实际问题中土壤性质和植被覆盖情况往往十分复杂多变, 如不考虑这一复杂情况, 则可得到土壤抗冲蚀能力与坡面坡度之间的简化关系

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma)d(N_0 \cos \theta - \sin \theta) \quad (10)$$

$\cos \theta$ 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(10)还表明, 坡面土壤稳定性(抗冲蚀能力)还与土壤性质、颗粒粒径、土壤摩擦系数 N_0 等因素有关。

3 土壤侵蚀的坡度界限

根据上述分析结果, 运用式(1), 可得到坡面土壤侵蚀率 E_s 与坡度的关系

$$E_s = A[\gamma(I - f)L \sin \theta \cos \theta - \frac{d}{n} [n(I - f)L]^{2/5} (\gamma_s - \gamma)(N_0 \sin^{0.3} \theta \cos^{1.4} \theta - \sin^{1.3} \theta \cos^{0.4} \theta)] \quad (11)$$

由(11)对 θ 求导, 取 $dE_s/d\theta = 0$, 可得到界限坡度 θ_m 与各影响因素之间的定量关系

$$\frac{\sin^{0.7} \theta_m \cos^{0.6} \theta_m (\cos^2 \theta_m - \sin^2 \theta_m)}{N_0 \cos \theta_m (0.3 \cos^2 \theta_m - 1.4 \sin^2 \theta_m) - \sin \theta_m (1.3 \cos^2 \theta_m - 0.4 \sin^2 \theta_m)} = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{[n(I - f)L]^{3/5}} \quad (12)$$

即有

$$\theta_m = F\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}, d, n, I - f, L, N_0\right) \quad (13)$$

表明坡度界限是一个变量, 随颗粒粒径 d 、容重 γ_s 、坡面糙率 n 、径流长度 L 、降雨入渗差值(净雨量) $I - f$, 以及土壤摩擦系数 N_0 等因素的不同而改变。可得到界限坡度与综合参数 $(\gamma_s - \gamma)d / [\gamma(n(I - f)L)^{3/5}]$ 之间的关系变化图(略)。根据实际问题, 一般情况下土壤侵蚀的坡度界限值应在 $45^\circ \sim 48^\circ$ 范围内。

参 考 文 献

- 1 Zingg A W. Degree and length of land slope as it affect soil loss in runoff. *Agric Eng* 1940, 21: 59~64
- 2 Yair A, Klein M, The influence of surface properties on flow and erosion processes on debris covered slopes in an arid area. *Catena* 1973, 1: 1~8
- 3 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验. 中国水土保持, 1985, (2)
- 4 Singer M J, Blackard J. Slope angle-interrill soil loss relationships for slopes up to 50%. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46(6): 1270~1273.
- 5 曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究. 水土保持通报, 1993, 13(4): 1~5