

# 土壤侵蚀的坡度界限研究

曹文洪

(水利水电科学研究院泥沙研究所·北京·100044)

## 提 要

通过理论分析,指出土壤侵蚀坡度界限不是一个常数,是与坡面径流深、泥沙粒径以及植被等因素存在一定函数关系,得出坡度界限大于40°。

关键词:土壤侵蚀 坡度界限 函数关系

## Slope Thresholds of Soil Erosion

Cao Wenhong

(Silt Institute under Academy of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Beijing, 100044)

## Abstract

Based on some theoretical analyses and available experimental achievements, the author expounds that the slope thresholds are not constant, and are functional relationship with the runoff depth, sediment particle and vegetation cover. The slope thresholds are all greater than 40 degree.

Key words soil erosion slope thresholds functional relationship

## 一、研究现状

坡度是影响土壤侵蚀的主要地形因素,在一定范围和条件下,土壤侵蚀量与坡度成正比关系。许多人工降雨试验和野外观测资料表明:在斜面坡度超过一定限度时,它们的侵蚀量与坡度呈反比关系,说明存在坡度界限。下面举二例:

伦纳(F.G.Renner)<sup>[1]</sup>在分析爱达荷州博伊斯河(Boise River)流域的实测资料得出,坡地受侵蚀的面积百分数随坡度而异(图1),其坡度界限约40.5°。

陈法扬<sup>[2]</sup>采用人工降雨装置在一个面积为6m<sup>2</sup>可调试小区木盒内进行试验,土壤为发育于第四纪红粘土,在土壤裸露,控制雨强基本一致的情况下,得到9组数据(见表1),得出土壤侵蚀的坡度界限为25°。

以上各举野外观测和室内人工降雨试验一例,说明土壤侵蚀中存在坡度界限,但尚停留在对现象的描述,没有进行深入分析。霍顿(R. E. Horton)<sup>[3]</sup>早在1945年对坡度界限进行了初步分析,此后无人深入研究这方面工作。霍顿的分析如下:设坡面单宽径流量顺坡向下的增加率为 $dq/dx$ ,则

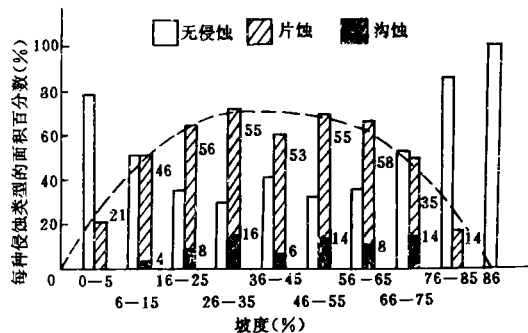


图1 坡度与侵蚀的关系

表 1 坡度与土壤冲刷量的关系

坡度(°)	0	3	7	13	17	20	24.5	27	30
土壤冲刷量 (g/s)	0.4	3.2	6.8	11.2	14.5	19.4	26.5	23.6	15.6

距分水岭  $x$  处的单宽流量为  $\frac{dq}{dx}x$ , 水层厚度为  $h_x$ , 坡面角度为  $\alpha$ , 由曼宁公式可得坡长  $x$  处的流速:

$$V_x = \frac{1}{n} h_x^{2/3} \tan^{0.5} \alpha \quad (1)$$

则有

$$\frac{dq}{dx} x = V_x h_x \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式则有:

$$\frac{dq}{dx} x = \frac{1}{n} h_x^{5/3} \tan^{0.5} \alpha \quad (3)$$

$$\text{解上式可得坡长为 } x \text{ 处坡面流的厚度 } h_x = \frac{\left(\frac{dq}{dx} n x\right)^{3/5}}{\tan^{0.3} \alpha} \quad (4)$$

所以, 距分水岭  $x$  处的坡面水流冲刷能力  $\tau_0$  为:

$$\tau_0 = r h_x \sin \alpha = r \left(\frac{dq}{dx} n x\right)^{3/5} \frac{\sin \alpha}{\tan^{0.3} \alpha} \quad (5)$$

由  $\frac{d\tau_0}{d\alpha} = 0$  可求得极大值处的  $\alpha$  值:  $\alpha = 57^\circ$ 。

所以霍顿分析得出的坡度界限为  $57^\circ$ 。

目前, 人们一般认为, 坡度对土壤侵蚀的影响是两方面的: 一方面, 随着坡度的增加, 坡面水流速度加大, 侵蚀能力加强, 又由于坡度增加后, 土壤的稳定性降低, 抗蚀能力减弱; 另一方面, 随着坡度的增大, 受雨面积的减小, 即较陡的斜坡上表土被水淹没层比在缓坡为小。可见, 坡度对土壤侵蚀影响的两个方面是表现为某种形式的作用力与反作用力的对应关系, 在两种作用力的此增彼减的过程中, 必然存在一个界限值。这个界限值目前各家得出的相差较大, 是否为固定值, 还是随哪些因素变化, 下面对此进行初步分析。

## 二、基本理论分析

### (一) 分析方法一

在理想均质坡面的条件下, 若坡面水流冲刷能力以单位坡面的水流拖拽力  $\tau_0$ , 则  $\tau_0$  既与坡面坡度角  $\alpha$  有关, 又与水层厚度  $h_x$  有关, 据图 2 有:

$$\tau_0 = r h_x \sin \alpha \quad (6)$$

其中  $r$  为水的比重。在一定的降雨和坡长的情形下, 坡面水层厚度又与坡面坡度有关<sup>(4)</sup>(图 3)。当地面水平时, 受雨面积为  $OA$ , 设此时产生的水层厚度为  $h_0$ , 而当该地面具有  $\alpha$  坡度时, 受雨面积缩小为  $OA'$  ( $OA' = OA \cos \alpha$ )。因此, 坡度为  $\alpha$  的坡地上的水层厚度  $h_x$  与等面积的水平地面上的水层厚度

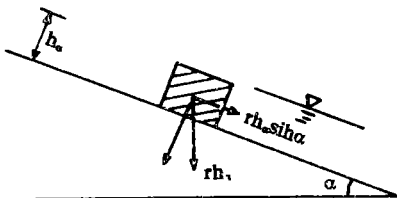


图 2 坡面水流切应力示意图

$h_0$  之间的关系为：

$$h_a = h_0 \cos \alpha \tag{7}$$

由式(6)和(7)得到坡面水流冲刷能力  $\tau_0$  如下：

$$\tau_0 = \frac{1}{2} r h_0 \sin 2\alpha \tag{8}$$

由  $\frac{d\tau_0}{d\alpha} = 0$ ，可得坡度界限为  $45^\circ$ 。

如果考虑泥沙本身重力沿坡面分力的作用，则坡面泥沙运动的驱动力由水流拖拽力和水中泥沙层本身重力沿坡面分力两部分组成。水下泥沙重力沿坡面的分力  $G_x$  为：

$$G_x = (r_s - a) d \sin \alpha \tag{9}$$

式中： $r_s$ —泥沙比重； $d$ —泥沙粒径。

则坡面泥沙的驱动力  $\tau$  为：

$$\tau = \tau_0 + G_x \tag{10a}$$

$$\text{即 } \tau = \frac{1}{2} r h_0 \sin 2\alpha + (r_s - a) d \sin \alpha \tag{10b}$$

由  $\frac{d\tau}{d\alpha} = 0$ ，可得坡度界限如下：

$$\cos \alpha = \frac{1}{4} \left( \sqrt{\left( \frac{r_s - r d}{r h_0} \right)^2 + 8} - \frac{r_s - r d}{r h_0} \right) \tag{11}$$

可见，界限坡度不是常数，而是与径流深和泥沙粒径有关。

一般情况下，泥沙的比重  $r_s = 2.65 \text{ t/m}^3$ ，水的比重  $r = 1 \text{ t/m}^3$ ，代入(11)式可得：

$$\cos \alpha = \frac{1}{4} \left( \sqrt{2.72 \left( \frac{d}{h_0} \right)^2 + 8} - 1.65 \frac{d}{h_0} \right) \tag{12}$$

当  $\frac{d}{h_0} \leq 0.01$  时， $\alpha = 45^\circ$ 。由(12)

式可以得出土壤侵蚀坡度界限与降雨径流深和坡面泥沙粒径的关系(图4)。可见，土壤侵蚀的坡度界限随着  $d/h_0$  值的增大而增大，换句话说，对于泥沙组成的一定坡面，随着降雨径流深的增加，土壤侵蚀的坡度界限将减小。

(二)分析方法二

在流域内面蚀区域坡面上，降雨

满足入渗后，超渗雨覆盖着整个很粗糙的坡面上出现薄层水流。在坡面上流动的水流在向洼地或水道集中的沿途中，呈薄而均匀的片流形式向低处输送泥沙和其它细微物质，由于厚度很小，因而侵蚀作用较弱，在坡面接近山顶的部分只能输送雨前已经风化变得疏松的表土和降雨击溅发生位移的物质。山坡高处的水流在向坡脚流动过程中，沿途不断有水流加入，厚度变深流速加大，冲刷能力增强。在径流达到平衡时的坡长为  $L$ ，此时水流的冲刷能力最强，坡面水流的模拟如图5所示。在坡面上任取一个长度  $dx$ ，则通过断面1的单宽径流量为  $q$ ，通过断面2的单宽径流量为  $\frac{\partial q}{\partial x} dx$ ，则两断

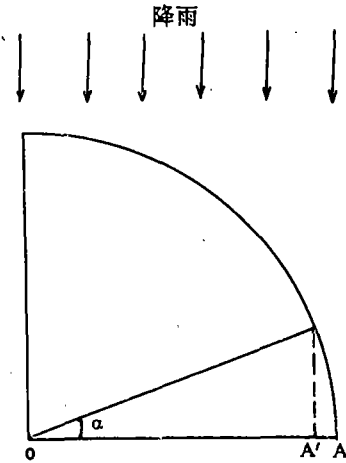


图 3 坡面坡度与受雨面积之间的关系

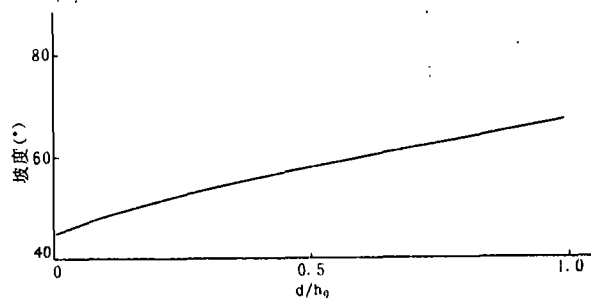


图 4  $\alpha$  与  $d/h_0$  关系

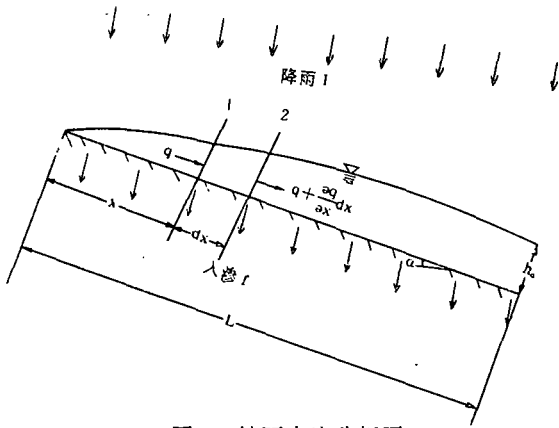


图5 坡面水流分析图

面间径流量变化值为  $q + \frac{\partial q}{\partial x} dx$ , 假若在一定时段内, 降雨和入渗率基本保持不变, 则  $dx$  段增加的径流量为  $(I-f) dx \cos \alpha$ , 所以有:

$$(q + \frac{\partial q}{\partial x} dx) - q = (I-f) dx \cos \alpha \quad (13a)$$

$$\text{即 } \frac{\partial q}{\partial x} dx = (I-f) dx \cos \alpha \quad (13b)$$

所以, 离坡顶距离等于  $L$  的单宽流量为:

$$q = \int_0^L \frac{\partial q}{\partial x} dx = \int_0^L (I-f) \cos \alpha dx \quad (14a)$$

$$\text{即 } q = (I-f) L \cos \alpha \quad (14b)$$

坡长  $L$  处的坡面流速采用曼宁公式计算, 所以,

$$q = V h_0 = \frac{1}{n} h_0^{5/3} \tan^{0.5} \alpha = (I-f) L \cos \alpha \quad (15)$$

$$\text{由上式可得: } h_0 = [n(I-f)L]^{3/5} \frac{\cos^{0.6} \alpha}{\tan^{0.3} \alpha} \quad (16)$$

坡长  $L$  处的水流拖拽力  $\tau_0$  为:

$$\tau_0 = r h_0 \sin \alpha = r [n(I-f)L]^{3/5} \sin^{0.7} \alpha \cos^{0.9} \alpha \quad (17)$$

由  $\frac{d\tau_0}{d\alpha} = 0$ , 可得坡度界限  $41.4^\circ$ 。

如果考虑泥沙重力沿坡面的分力作用, 则坡面泥沙的驱动力  $\tau$  由(10a)式可得:

$$\tau = \tau_0 + Gx \quad (18a)$$

$$\text{即 } \tau = r [n(I-f)L]^{3/5} \sin^{0.7} \alpha \cos^{0.9} \alpha + (r_s - r) d \sin \alpha \quad (18b)$$

由  $\frac{d\tau}{d\alpha} = 0$ , 可得坡度界限如下:

$$\frac{0.9 \sin^2 \alpha - 0.7 \cos^2 \alpha}{\sin^{0.3} \alpha \cos^{1.1} \alpha} = \frac{r_s - r}{r} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}} \quad (19)$$

$$\text{令 } f(\alpha) = \frac{0.9 \sin^2 \alpha - 0.7 \cos^2 \alpha}{\sin^{0.3} \alpha \cos^{1.1} \alpha}$$

$$\text{所以 } f(\alpha) = \frac{r_s - r}{r} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}} \quad (20a)$$

$$\text{即: } \alpha = F\left(\frac{r_s - r}{r}, d, n, I-f, L\right) \quad (20b)$$

可见, 土壤侵蚀的坡度界限与泥沙粒径, 坡面糙率(植被)、径流达到平衡的坡长及降雨与入渗的差值(即径流深)有关。

当  $\frac{r_s - r}{r} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}} \leq 0.01$  时,  $\alpha = 41.4^\circ$ , 由(19)式可以得出土壤侵蚀坡度界限与泥沙粒径、径流深、坡面糙率和坡长的关系(图6)。可见, 对于泥沙组成一定的坡面, 糙率越大, 径流达到平衡的距离越长以及径流深越大, 土壤侵蚀的界限坡度越小。

综上所述可见, 土壤侵蚀的坡度界限似应大于  $40^\circ$ 。同时, 对天然的径流小区, 由于  $d/h_0$  或  $\frac{r_s - r}{r} \frac{d}{[n(I-f)L]^{3/5}}$  值比较小, 因此, 坡度界限应以接近  $41.4^\circ$  或  $45^\circ$ 。

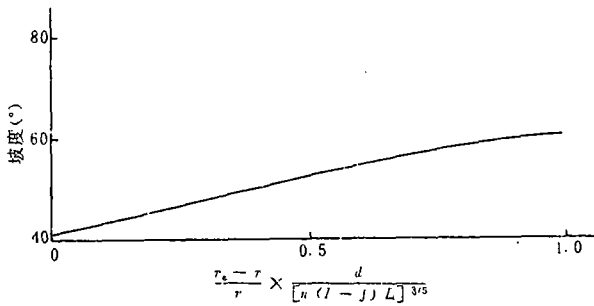


图6  $\alpha$  与  $\frac{r_s - r}{r} \frac{d}{[u(I-f)L]^{3/5}}$  关系

### 三、讨 论

通过以上分析,得出了土壤侵蚀的坡度界限与泥沙粒径、径流深和坡面糙率的关系。指出:坡度界限将在大于  $40^\circ$  的范围内出现。分析野外天然径流小区的资料有实际的意义,但由于不同坡度小区的植被、土质和微地形等的不同,尽管分析了天水、西峰和绥德许多径流小区的资料,但还不能满足理论分析所要求精度。但也从中发现许多斜面坡度超过一定限度,侵蚀量与坡度呈反比的现象。例

如南小河沟天然荒坡径流场董12和董15,皆为红土泻溜陡坡,土质、植被和降雨相近,董12坡度为  $54^\circ 24'$ ,董15为  $50^\circ 13'$ ,但董15的土壤侵蚀比董12严重。黄德胜<sup>[5]</sup>在分析平定河水库(位于汉江二级支流泥沙来源时,采用“树根法”、“痕迹法”和土层对比”等方法,得出不同坡度的坡耕地与土壤流失量的关系,在  $40^\circ$  范围内,土壤侵蚀的坡度界限还没有出现,说明如果出现界限坡度将在  $40^\circ$  以上。另外,室内人工降雨试验得出的坡度界限较野外观测的坡度界限为小,两者差异的主要原因可能是室内人工降雨的模拟试验是用扰动土和在雨型和降雨结构恒定情况下进行的,同时土壤是裸露的,而野外观测的结果是在变雨型和结构(雨滴粒径和分布密度)以及原状土的情况下得出的。

确定土壤侵蚀的坡度界限对于水土保持的布设具有重要的意义,这个问题十分复杂,本文对此进行了初步探讨,今后还需要大量的野外观测资料加以验证。

### 参 考 文 献

- [1] Renner, F. G., Conditions Influencing Erosion of the Boise River Watershed. V. S. Dept. Agric Tech. Bull. 528, 1936
- [2] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验. 《中国水土保持》, 1985年, 第2期
- [3] Horton, R. E., Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins, Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 56, NO. 3, 1945
- [4] 尹国康. 地貌过程界限规律的应用意义. 《泥沙研究》, 1984年, 第4期
- [5] 黄德胜. 平定河水库泥沙来源与防治. 《泥沙研究》, 1985年, 第3期