

坡度在坡面侵蚀中的作用*

靳长兴

中国科学院
（国家计划委员会 地理研究所 北京 100101）

摘 要 本文分析了坡度在坡面侵蚀中的作用，包括不同坡度下被蚀体的特征差异，坡度对坡面溅蚀、坡面入渗、坡面径流及坡面侵蚀的影响，最后从理论上阐明了坡面侵蚀中的临界坡度。

关键词 坡度 侵蚀

分 类 （中图法）P931 S157.1 （科图法）65.26621 57.15

坡度是坡面土壤侵蚀中影响最大的因素^[1]。关于坡度与坡面土壤侵蚀的关系国内外已作了大量的研究，如早就有人根据实验得出侵蚀与坡度之间如下的关系^[2-4]：

$$S \propto X^a \tan^b \beta \quad (1)$$

式中 S 代表侵蚀量； X 代表坡长； β 代表坡度； a 、 b 为常数， $a=1.35-1.73$ ； $b=1.35-1.4$ 。

(1)式是在坡度相对较小时得出的结果，在坡度较大时并不适应。一般认为，在坡度较小时（尤其是在坡度为5%—10%（2°—6°）时），侵蚀随坡度的变化较明显，而当坡度较大时，侵蚀量随坡度的变化不大^[5]。在侵蚀随坡度的变化中存在着一个临界坡度，在此坡度下侵蚀量最大。

对临界坡度从理论上已作了不少研究，但目前仍无一致结论。由于其影响因素比较复杂，故对其可求性仍有疑问。本文从影响坡面侵蚀的诸因素出发，分析坡度在土壤侵蚀中的作用，最后从理论上阐明坡面侵蚀的临界坡度。

1 不同坡度下的被蚀体特征差异

侵蚀量的大小与被蚀体——土壤的特性密切相关，而土壤特性与土壤形成的环境不无关系。坡面土壤的不稳定性与坡度的大小成正比，坡度愈大，土体的不稳定性愈强，在外力作用下发生下移的可能性愈大，这一点在人为干扰较大的坡耕地上表现的尤为突出。坡度较大的地区，由于外力及侵蚀长期作用的结果，土层一般较薄、地表颗粒粒径较粗，这一点 Dunne T. 和 Aubry B. F. 1986 年在肯尼亚南部山区的调查已得到证实^[6]。土层薄、地表颗粒粗直接影响降雨过程中的产流量和土壤蓄水量。颗粒粗虽有助于土壤入渗，但也有利于土壤排水。由颗粒粗化而引起的入渗量的增加会被坡度增加而引起的坡面流速加快、入渗时间缩短而减少的入渗量所抵消，故当坡度达到一定值后，坡面总入渗量随坡度的增加

* 国家自然科学基金资助项目（49501002）

收稿日期：1995-11-06，收到修改稿日期：1996-01-15

而减小。土壤含水量的多寡对植物生长有直接影响，尤其在干旱地区，土壤水已成为植物生长的制约因素。坡度增加使入渗量减少，造成土壤含水量低下，对坡面植物生长较为不利，而一定覆盖度植被的存在是保证土壤不被侵蚀的基本条件。野外考察不难发现，坡度较大的地区植被覆盖率一般较低，植物生长较差。

土壤抗蚀力是指土壤抵抗侵蚀的能力。在相同的降雨径流条件下，抗蚀力大的土壤在降雨过程中产生的侵蚀量较小，而抗蚀力小的土壤产生较大的侵蚀量。不少研究表明，土壤抗蚀力的大小与土壤中的粘粒含量成正比^[5]。坡度较大的地区土壤粘粒含量较少，有机质含量低下，因而坡面土壤抗蚀力较差。土壤抗剪力的大小是土壤含水量的函数，含水量增大，抗剪力小。土壤抗剪力随坡度的变化目前还不十分清楚，但至少有一点在黄土高原地区已经得到证实^[7]，即在相同条件下平缓坡地的抗剪力较陡坡地大。

2 坡面入渗随坡度的变化

目前，有不少人认为坡度对土壤侵蚀的影响是通过影响土壤入渗而实现的。入渗随坡度的增大而减小，坡度越大，降雨过程中土壤的入渗量越小，产生的径流量越大，因而产生的侵蚀量越大。

陈浩等^[8]利用室内人工模拟降雨试验发现，在其他条件相同时，累积入渗量（ F ）与地表坡度（ β ）成反比关系，其关系式可表示为：

$$F = \frac{\beta}{b\beta - a} \tag{2}$$

式中 a 、 b 为常数。当坡度小于 18° 时，入渗量随坡度变化较大；当坡度超过 18° 后入渗随坡度的变化逐渐减小。根据我们在张家口市郊区沈家屯镇马场沟流域的人工降雨入渗试验发现，在其它条件相同时，入渗率随坡度的减小在坡度小于 15° 时比较显著，而当坡度超过 15° 后将不再明显（见表 1）。

表 1 不同坡度下入渗达到稳渗时的总入渗量（ F ）、稳渗率（ f_c ）及侵蚀量（ S ）

Tab. 1 Accumulated infiltrations (F), final infiltration rates (f_c) and sediment yielded (S) under different slope gradients

β	0°	5°	10°	15°	20°
F (mm)	57.7	48.8	35.8	31.6	32.0
f_c (mm/min)	0.627	0.547	0.399	0.337	0.291
S (g)	4.6	56.8	42.6	73.11	102.7

注：试验的详细情况见文献 [9]。

根据分析发现^[9]，对不同坡度下的入渗过程用 Philip 入渗方程拟合均可得到较满意的结果。在入渗方程中，重力作用项随坡度的增大而减小，至少部分原因是因为随坡度的增大重力在顺坡方向上的分力增强，入渗时间缩短。扩散项（毛管力作用项）不随坡度的变化而变化，仅与土壤孔隙率有关。

3 坡度对溅蚀的影响

溅蚀是一个重要的侵蚀形式。因雨滴的动能远较薄层水流的能量为大,故溅蚀作用也远较薄层水流的侵蚀作用为大^[10,11]。关于溅蚀的研究已经很多。暴雨特征和土壤特性是决定溅蚀量大小最重要的因素,坡度对溅蚀的作用也已被人们所认识。当坡度为 10% 时,击溅起的土壤向下坡方向移动的距离约是向上坡方向移动距离的 3 倍多。当降雨侵蚀力一定时,溅蚀量是坡度的函数,随坡度的增大而增大^[12,13],但当坡度达到 33% (18.3°) 时,溅蚀量又随坡度的增大而减小^[14]。溅蚀随坡度的变化除重力因素作用外,还与坡面薄层水流的厚度与雨滴的直径之比有关。当薄层水流厚度小于雨滴直径时,薄层水流的存在加强了溅蚀作用,这种作用随水层厚度的增大而增大。当薄层水流厚度与雨滴直径相等时溅蚀作用最强^[14]。当薄层水流厚度大于雨滴直径后溅蚀的分散作用随薄层水流厚度的增加而逐渐减弱。当薄层水流厚度超过雨滴直径 3 倍时,溅蚀作用基本消失^[13]。因在降雨一定时,坡面产流量随坡度的增大而增大,故薄层水流的厚度也随之相应的增加,但在不超过雨滴直径时薄层水流厚度的增加实际上加强了溅蚀的作用。当坡度超过某一定值时薄层水流厚度将超过雨滴直径,溅蚀作用将随之减弱。Foster 和 Martin 亦认为^[15],这一坡度约为 33% (18.3°)。雨强不仅影响雨滴的组成,而且决定产流量,同一坡度不同雨强下所形成的薄层水流的厚度与雨滴的直径的相对大小不同,因此,最大溅蚀坡度的大小可能在不同降雨条件下不同。

在薄层水流对溅蚀影响的同时,溅蚀的存在也增大了薄层水流的紊动性,使水流的夹沙能力加强,坡面摩阻系数随着雨滴的击溅作用而增大^[13]。当然,溅蚀最强烈的时刻,摩阻作用最大。但当坡度超过最大溅蚀坡度时,摩阻作用随坡度的增大而逐渐减弱^[16]。

大量研究证明,在降雨侵蚀过程中,降雨开始不久出现侵蚀高峰。许多学者认为这种现象是由于降雨开始时地表土壤疏松或结皮影响的结果。通过上述分析,我们不难看出,薄层水流的形成也是一个重要因素。降雨开始后随着薄层水流厚度的增加和土壤的密实,溅蚀的作用逐渐减小,流水侵蚀随时间而逐渐增大,整个侵蚀过程中仍以流水侵蚀为主。当然,细沟形成后情况将发生变化。

4 坡面流速与坡度的关系

目前普遍认为,降雨强度较大时坡面会产生片状水流。但因坡面凹凸不平,往往难以形成大面积的片状水流。在比较平坦的坡面上,片状水流的面积可以达到 50% 以上。因为大暴雨是产生径流和侵蚀的主要暴雨,也是我们研究的重点,所以研究大暴雨的片状水流是可行的。坡面流速对侵蚀的影响从表 1 中可窥见一斑。当坡度超过 15° 时,虽然总入渗量(亦即总径流量)变化不大,但侵蚀量随坡度增加较大,唯一的解释是坡面流速随坡度的增加而增大,土壤侵蚀力因之加强。

坡面流速与坡度、坡面水深及坡面摩阻系数有关。根据水力平衡原理其关系可表示为^[17]:

$$V = \frac{1}{\sqrt{f}} (2ghS)^{1/2} \quad (3)$$

式中 V 代表流速; f 代表摩阻系数; h 代表水深; S 代表坡度, 等于 $\sin\beta$ 。

摩阻系数 f 与构成坡面糙率颗粒的粒径及坡面水深有关, 可表示为:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.07 \log_{10} \left(\frac{h}{k} \right) + 2.0 \quad (4)$$

式中 k 为大于等于 84% 的床面颗粒的粒径。上述关系可近似表示为:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = a \left(\frac{h}{k} \right)^b \quad (5)$$

式中 a 、 b 为常数。将 (5) 式代入 (3) 式得:

$$V = a \sqrt{2gk}^{-b} h^{0.5+b} S^{0.5} \quad (6)$$

对于有限的 h/k 值, b 值为

$$b = \begin{cases} 1/8 & 40 < h/k < 5 \times 10^4 \\ 1/6 & 10 < h/k < 100 \\ 1/2 & 1 < h/k < 10 \\ 1 & 1/2 < h/k < 2 \end{cases} \quad (7)$$

由上式可见, 坡面流速的大小与坡面水深及坡面糙率有关。对于一个固定的坡面, k 基本不变。因此, 当水深较大时, (6) 式中 h 的指数为 0.62; 当水深中等时, (6) 式中的 h 的指数为 0.67, 此时水流为满宁流; 当水深较小时, (6) 式中 h 的指数为 1.0—1.5。

5 坡面侵蚀的临界坡度

研究表明, 在侵蚀随坡度的变化过程中存在着一个临界坡度, 在此坡度下土壤侵蚀量最大。关于临界坡度国内外已作了大量研究, 但对临界坡度的大小, 理论上仍没有完全解决。许多室内外试验已经证明, 临界坡度介于 25° — 28° 之间^[18]。

一般认为, 从理论上求解临界坡度比较困难, 因为影响临界坡度的因素众多, 且它们之间相互联系, 问题比较复杂。另外, 自然界也很难见到上下坡度完全一致的坡面。事实的确如此, 但不能就此而缩手不前。只要抓住主要因素进行分析, 问题就不难解决。

上面的分析已说明, 坡度对坡面入渗、坡面径流的影响最终是通过坡面流速体现出来的。坡面侵蚀力的大小与坡面径流量和坡面流速成正比。坡面水流所以具有侵蚀力是因其具有能量。侵蚀力的大小与水流所具有的能量成正比, 这一点在溅蚀中已经得到证实(溅蚀量的大小与雨滴降落时的动能成正比)。以 E_v 代表坡面水流具有的能量, 则 E_v 可表示为^[18]:

$$E_v = \frac{1}{2} \rho q V^2 \cos^2 \beta \quad (8)$$

将 (6) 式代入上式, 并以 $\sin\beta$ 替代 S 得

$$E_v = \frac{1}{2} \rho (2ga^2)^{\frac{1}{1.5+b}} k^{-\frac{2b}{1.5+b}} q^{\frac{2.5+3b}{1.5+b}} \sin^{\frac{1}{1.5+b}} \beta \cos^2 \beta \quad (9)$$

式中 ρ 代表水的密度; q 代表单宽流量 (等于 Vh)。

从上式可以看出，坡面水流的能量是流量、坡面糙率（反映在 k 中）及坡度的函数。在降雨一定时，前两者基本不变。所以，能量仅仅是坡度的函数。

将 (9) 式对坡度求导得：

$$\beta = \arctan \left(\frac{1}{3 + 2b} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

(10) 式即为临界坡度的表达式。可以看出，临界坡度与坡面水深和土壤表面颗粒粒径之比有关。将 (7) 式中 b 值代入 (10) 式得：

$$\beta = \begin{cases} 29^\circ & 40 < h/k < 5 \times 10^4 \\ 28.7^\circ & 10 < h/k < 100 \\ 26.6^\circ & 1 < h/k < 10 \\ 24.1^\circ & 1/2 < h/k < 2 \end{cases} \tag{11}$$

由 (10) 式可见，水深较大时，临界坡度也较大；水深较小时，临界坡度也较小。临界坡度在 24° — 29° 之间，与众多的试验结果相吻合，说明结果是正确的。

6 讨论

综上所述，坡度对坡面侵蚀的影响最终是通过坡面径流量和流速而体现的。在降雨一定时，当坡度达到一定 (15° — 18°) 时，径流量随坡度将不再变化。侵蚀量随坡度增加的主要原因是流速的增大。因此，流速和流量是决定坡面侵蚀量大小的主要因素。以坡面水流的能量来反映坡面侵蚀力的大小是合理的，由此求得的临界坡度经实验证明也是正确的。

在求临界坡度时，我们仅仅考虑了坡面片状水流的侵蚀力。因侵蚀主要发生在大暴雨期间，因此片状水流是可以产生的，至少在小范围内是存在的。溅蚀主要作用在降雨初期，因最大溅蚀坡度小于临界坡度，故在研究中没有考虑溅蚀的影响是可行的。由于在临界坡度下坡面侵蚀量最大，因而在该坡度下片蚀也最容易过渡到细沟侵蚀，进而发展到沟蚀。当然，一旦沟蚀形成，侵蚀机理将发生变化，这种情况下的临界坡度需进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Meyer L D. Erosion Processes and Sediment Properties for Agricultural Cropland. in Abrahams AD. Hillslope Processes (ED). Allen and Unwin. 1986.
- 2 Zingg A W. Degree and Length of Land Slope as It Affects Soil Loss in Runoff. Agri. Engi.. 1940. 21.
- 3 Musgrave G W. Quantitative Evaluation of Factors in Water Erosion—A First Approximation. Soil and Water Conser. 1947. 2.
- 4 Kirkby MJ. Erosion by Water on Hillslope. in Chorley R J (ED) Water, Earth and Man. Methuen. London. 1969.
- 5 Evans R. Mechanics of Water Erosion and Their Spatial and Temporal Controls: An Empirical Viewpoint. in Kirkby M J. and Morgan R P C. (ED) Soil Erosion. John Wiley and Sons. 1980.
- 6 Dunne T. and Aubry B F. Evaluation of Horton's Theory of Sheetwash and Rill Erosion on the Basins of Field Experiments. in Abrahams A D. Hillslope Process (ED). Allen and Unwin. 1986.
- 7 陆兆熊等. 黄土抗剪力及可蚀性的时空变化规律. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 水利电力出版社. 1990.

- 8 陈浩等. 坡度对坡面径流深、入渗量影响的试验研究. 晋西黄土高原土壤侵蚀规律实验研究文集. 水利电力出版社. 1990.
- 9 Jin Changxing *et al.* An Experimental Study of Infiltration and Erosion under Slope Gradients and Vegetal Covers. Chinese Geography, 1995. (4).
- 10 Stallings J H. Soil Conservation. Englewood, Diffs. New Jersey. 1957.
- 11 Hudson N W. Soil Conservation. Batsford, London. 1971.
- 12 Ellison W D. Studies of Raindrop Erosion. Agri. Engi. 1944. 25.
- 13 Thornes J B. Erosion Processes of Running Water and Their Spatial and Temporal Controls: An Theoretical Viewpoint. in Kirkby M J. and Morgan R P C. (ED) Soil Erosion. John Wiley and Sons. 1980.
- 14 Palmer R S. The Influence of a Thin Water Layer on Water Drop Impact Forces. Int. Associ. Scient. Hydrol. Pub 65. 1963.
- 15 Foster R L and Martin G L. Effect of Unit Weight and Slope on Erosion. Irrigation and Drainage Div., Proc. Amer. Soc. Civil Engi. 95 (ZR4) 1969.
- 16 Savat. The Hydraulics of Sheet Flow on a Smooth Surface and the Effect of Simulated Rainfall. Earth Surface Process and Landforms, 1977. 2.
- 17 Carson M A. and Kirkby M J. Hillslope Form and Process. Cambridge University Press. 1972.
- 18 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度. 地理学报. 1995. 50 (2).

THE ROLE OF SLOPE GRADIENT ON SLOPE EROSION

Jin Changxing

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

The effects of slope gradient on slope erosion was through its impacting on slope soil stability, soil depth, soil infiltration, and slope flow velocity.

Field observation shows that with the increase of slope gradient, the stability of soil on slope surface decreases. Under long time erosion of slope flow, soil grains on slope surface become coarser and the depth of soil become thinner. Thus, during raining periods, the volume of infiltration decreases and the volume of runoff increases, which was confirmed by field experiments. Experiment in the suburb of Zhangjiakou City, Hebei Province showed that both the total infiltration and the final infiltration were inversely proportional to slope gradient under 15° . When slope is great than 15° — 18° , the infiltration does not vary with slope obviously.

The amount of drop splash is related to rate of drop diameter and depth of surface sheet flow and slope degree. When the depth of sheet flow is less than drop diameters, the existence of sheet flow actually enforces the splash, until the depth of sheet is equal to the drop diameter, when the splash reaches its maximum. Then, the splash reduces as the sheet depth increase. Under certain amount of precipitation, the volume of runoff increases with slope, and so does the depth of sheet flow, until the slope gradient reaches 18.3° (Foster, R. L. and Martin, G. L., 1969). So, the drop splash increases with slope gradient and reaches its maximum when slope gradient is 18.3°

(Palmer, R. S., 1963).

Experiments (Jin C X., 1996) tested that inspite of infiltration does not increase with slope when gradient is greater than 15° — 18° , the amount of erosion increases greatly. The only reasonable explanation for the phenomena is the increase of flow speed with gradient. The flow velocity can be expressed as:

$$V = a \sqrt{2g} k^{-b} h^{0.5+b} s^{0.5}$$

In which, V represents flow velocity, h and k represent sheet depth and the grain diameter which is equal to or larger than 84% of grain particles, s represents slope gradient and a and b are parameters.

The erosivity of slope flow is proportional to flow energy. When the energy of flow reaches its maximum, the erosivity of flow also reaches its maximum. the flow energy can be expressed as:

$$E_v = \frac{1}{2} \rho (2ga^2)^{\frac{1}{1.5+b}} k^{-\frac{2b}{1.5+b}} q^{\frac{2.5+3b}{1.5+b}} \sin^{\frac{1}{1.5+b}} \beta \cos^2 \beta$$

In which, E_v represents flow energy, q represents unit width flow, and β represents slope angle. $s = \sin \beta$. ρ represents water density.

From the above equation, it can be seen that when

$$\beta = \arctan \left(\frac{1}{3 + 2b} \right)^{1/2}$$

E_v reaches its maximum, i. e. when $\beta = 24.1^{\circ}$ — 29° .

The conclusion is that when slope is between 24° and 29° , slope erosion reaches its maximum.

Key words Slope gradient. Soil erosion