

黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件

廖义善^{1,2}, 蔡强国^{2†}, 程琴娟^{2,3}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 430070, 武汉; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环与地表过程重点实验室, 100101, 北京; 3. 中国科学院研究生院, 100039, 北京)

摘要 用能量的观点来解释坡度、坡长、降雨对坡面侵蚀产沙的影响。通过分析安塞水土保持研究站、晋西离石县王家沟小流域的小区资料, 研究坡度、坡长、降雨对坡面侵蚀产沙的影响。结果表明: 降雨特性(雨量、雨强)对坡面侵蚀产沙的作用最大, 坡度次之, 坡长最小; 坡面侵蚀产沙的临界坡度分别受降雨、坡长大小的影响, 临界坡长分别受降雨、坡度、坡长大小的影响; 临界坡度、临界坡长都不是一个确定的值, 但在一定范围内变化, 变化范围由降雨、坡面地形等因素决定。研究成果可为黄土丘陵沟壑区坡面治理提供理论依据。

关键词 临界坡度; 临界坡长; 降雨特性; 坡面侵蚀产沙; 黄土丘陵沟壑区

Critical topographic condition for slope erosion in Hilly-gully region of Loess Plateau

Liao Yishan^{1,2}, Cai Qianguo², Cheng Qinjuan^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, 430070, Wuhan; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 100039, Beijing: China)

Abstract This paper tries to explain the effects of slope gradient, slope length and rainfall on slope erosion from the viewpoint of energy. Analyzing data about slope gradient, slope length and rainfall observed at Ansai station in Shanxi Province and Wangjiagou small watershed in Lishi, west of Shanxi Province, the author aims to know the influences of rainfall, slope gradient and slope length on slope erosion. The result shows that the influence of rainfall on slope erosion amount is the biggest, slope gradient is the second, and slope length is the smallest. Critical slope gradient is influenced by factors of rainfall and slope length, and critical slope length is influenced by factors of rainfall, slope gradient and slope length. Critical slope gradient or slope length is not a constant value, which varies in some ranges and depends on the factors of rainfall, slope type. The results provided the scientific theory basis for slope erosion control in the Hilly-gully region of Loess Plateau.

Key words critical slope gradient; critical slope length; character of rainfall; slope erosion; Hilly-gully region of Loess Plateau

坡面侵蚀产沙是一个复杂的物理过程, 与很多因素有关。降雨、坡度、坡长究竟怎样影响坡面侵蚀

量的大小, 临界坡度、临界坡长到底是多大, 国内外学者对此进行了广泛的研究^[1-7], 但得出的结论大

收稿日期: 2007-04-26 修回日期: 2007-11-14

项目名称: 国家自然科学基金委员会重点基金项目(40635027); 中国科学院地理科学与资源研究所自然科学基金延伸支持领域前沿项目(CXIOG-A04-10)

第一作者简介: 廖义善(1980—), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 产沙模型及 GIS 应用。E-mail: yishan_liao@163.com

† 责任作者简介: 蔡强国(1946—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀模拟与 GIS 应用。E-mail: caiqg@igsnrr.ac.cn

不相同。

随着坡度增加侵蚀量也不断增加,达到某一坡度值后,侵蚀量不再增加,并有减少的趋势,这一坡度就称为临界坡度。很多研究者通过实验或理论的方法求出了临界坡度的大小,但临界坡度值的大小有所不同^[1,8-10]。李全胜等^[11]在理论分析了降雨倾角、风向对不同坡向坡面承雨强度影响的基础上,认为均匀理想坡面土壤侵蚀的临界坡度不是常数。还有一些研究者发现,坡度对土壤侵蚀产沙的影响与土地利用类型有关^[12-13]。

坡长对坡面径流与水流侵蚀产沙过程的影响,也是各国学者研究的热点。W. H. Wischmeier等^[14]的试验资料表明,坡度较小时,侵蚀与坡长的关系不明显,当坡度较大时,侵蚀与坡长成正比;江忠善等^[15]通过分析1985—1989年安塞坡地径流小区5年观测资料,得出了相同的结论。西北黄河工程局根据径流小区资料分析研究,认为坡长与侵蚀有时成正比,有时成反比,视降雨特性而异^[16]。罗来兴^[17]根据实际调查资料分析得出,沿坡长侵蚀呈强弱交替变化。另外还有一些学者^[18-19]认为,随坡长增加,径流量增加,侵蚀量也增加,因此,随之水流含沙量也增加,水体搬运泥沙所消耗的能量加大,二者相互消长,结果从上坡到下坡侵蚀没有很大的差异。

综上所述,关于坡度、坡长、降雨对坡面侵蚀产沙的影响很多学者进行过深入研究,并取得了很多有意义的研究成果,但对坡面侵蚀量随坡面地形因子的变化情况仍未有定论,未能很好地考虑坡度、坡长、降雨变化对临界坡长,降雨、坡长变化对临界坡度的影响。就此,笔者通过对安塞水土保持研究站近5年的观测数据^[15]、晋西离石县王家沟小流域的14个径流小区的观测数据^①进行分析,用能量的观点来解释坡度、坡长、降雨对坡面侵蚀产沙的影响,并在三维状态下,直观地表现一个地形因子变化另一个地形因子的临界值也会随着变化的现象。本文将探讨并回答如下问题:坡度、坡长的临界值是不是定值;坡度、坡长、降雨对坡面侵蚀产沙的作用大小如何;坡度、坡长、降雨的变化究竟如何影响坡面侵蚀产沙。

1 研究区概况

安塞水土保持研究站位于陕北中部,延河一级支流杏子河下流的茶坊村。研究区沟壑纵横,属于典型的陕北黄土丘陵区第2副区,年平均降雨量为

549.1 mm,但分布不均匀,7—9月降雨量占全年降雨量的61.1%,水土流失严重。

晋西离石县王家沟流域径流场位于黄土丘陵沟壑区第1副区,沟壑密度达 7.01 km/km^2 ,海拔950~1320 m,年均降雨量为506.5 mm,降雨集中在5—9月份,汛期降雨量占全年降雨总量的80.6%。春季多西北风,夏季多南风,风力一般3~6级,阵风可达9级。

2 研究资料与研究方法

为了运用充足的数据来探讨坡度、坡长、降雨对坡面侵蚀产沙的影响,研究选用的数据来自2个研究区域。研究降雨对坡面侵蚀产沙的影响,选用的39场小区降雨数据为安塞水土保持研究站1985—1989年的观测数据^[15]。研究站设有6个坡度小区,分别为 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 和 28° ,小区水平投影面积均为 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$;4个坡长小区,分别为 $10 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、 $30 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 和 $40 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,坡度均为 30° 。由于安塞水土保持研究站布设的小区坡度与坡长的范围有限,所以,在研究坡度、坡长变化对坡面侵蚀产沙的影响时,选用布设小区坡度、坡长变化范围比较大的晋西离石县王家沟小流域所布设的14个小区的径流观测资料^①。14个径流小区中,最小坡度为 5° ,最大坡度为 36° ,最小坡长为10 m,最大坡长为105 m。

通过假设一个均匀的理想坡面,建立坡面侵蚀能量变化的公式,用能量变化 $(E - E_0)$ 来衡量降雨、坡度、坡长变化时,坡面侵蚀量的变化情况。然后通过对安塞水土保持研究站近5年的观测数据进行分析,分别用能量变化的观点来解释最大30 min降雨强度 (I_{30}) 对临界坡度、临界坡长的影响,并对不同 I_{30} 、坡度、坡长的次降雨侵蚀量进行统计分析,比较 I_{30} 、坡度、坡长变化对坡面侵蚀量的影响。最后利用离石王家沟流域的小区观测数据,用三维曲面形象地表示坡度、坡长共同作用下坡面侵蚀量的周期性变化情况。

3 地形因子临界条件的探讨与理论分析

3.1 坡度对坡面侵蚀产沙的影响

在坡面侵蚀产沙过程中,之所以存在一个临界坡度,是因为坡度因子对坡面侵蚀产沙的作用具有两面性。一方面,随着坡度的增大,水流受到重力作

① 1955—1981年山西省水土保持科学研究所径流测验资料,山西省水土保持科学研究所。

用,沿坡面向下的分力增大,而垂直于坡面的重力分力减小,水流与坡面的摩擦力减小,坡面水层流速增大,侵蚀能力增强。坡度愈大,坡面土体受到的斜坡重力切向分力愈大,则坡面上土体不稳定性愈大,就更易被径流冲走,同时,坡度的变化对入渗和产流也有影响。试验发现,在其他条件相同时,累积入渗量与地表坡度成反比关系,坡度愈大,降雨过程中土壤入渗量越小,产生径流量越大,因而产生的侵蚀量就越大^[1]。另一方面,坡度对坡面单位面积的雨量有影响,当雨滴垂直于水平地面降落,坡度越大时,单位长度的斜面所对应的水平投影越小,在坡面上单位面积所承接的雨量也随着减少,单位面积的径流量、冲刷量也相应地减少。坡度的增大是增加还是减少坡面的侵蚀量,主要看坡面侵蚀与

输沙能力增强的量(单位径流势能增大、单位面积入渗量减少)能不能弥补因为坡度增大、坡面承水面积减小而造成坡面侵蚀与输沙能力减少的量。

3.2 坡长对坡面侵蚀产沙的影响

为了研究坡长对坡面侵蚀产沙的影响,现假设一个理想的均匀坡面,坡长为 L ,坡度为 θ 。在坡面 X 处,取任意小一段长度为 ΔX 的坡面进行分析,该段坡面上径流的质量为 M ,此刻拥有的动能为 E_0 。在经过长度为 ΔX 的坡面后所具有的能量为 E ,增加泥沙挟带量和雨量的质量为 M_0 。完成侵蚀和挟沙流过长度为 ΔX 的坡面后,径流的速度为 v_1 , μ 为坡面 X 处的摩擦因数, g 为重力加速度(9.8 m/s^2)。水流参与侵蚀所消耗的能量为 $E_{\text{侵蚀}}$,坡面侵蚀过程如图 1 所示。

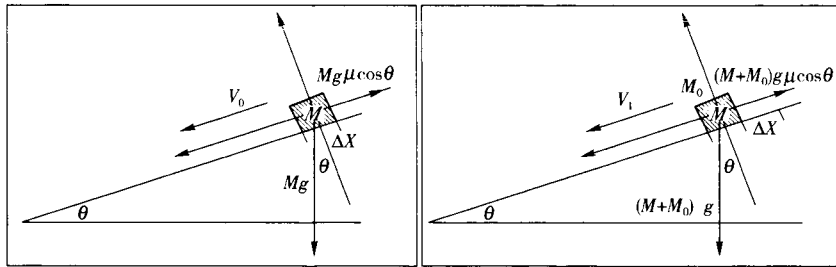


图 1 坡面侵蚀示意图

Fig.1 Sketch map of slope erosion

径流流经长度为 ΔX 的这段坡面,径流重力势能转换为动能的大小为

$$(M + M_0)g\Delta X\sin\theta$$

径流流经长度为 ΔX 的这段坡面,增加的挟沙量、雨量 M_0 由静止到运动消耗的能量为

$$1/2M_0v_1^2$$

径流流经长度为 ΔX 的这段坡面与接触面摩擦消耗的能量为

$$(M + M_0)g\mu\Delta X\cos\theta$$

综合来看,径流流过长度为 ΔX 的这段坡面时,动能表达式为

$$E = (M + M_0)g\Delta X\sin\theta + E_0 - 1/2M_0v_1^2 - (M + M_0)g\mu\Delta X\cos\theta - E_{\text{侵蚀}}$$

可知,从上坡到下坡,部分重力势能转化成动能。当 $E - E_0 > 0$ 时,水流能量增加,侵蚀能力加强,此时坡面侵蚀量随着坡长的增大而加强。当 $E - E_0 < 0$ 时,部分重力势能转换的能量不足以弥补水流侵蚀和输沙消耗的能量,径流侵蚀、输沙能力减弱。随着能量的减小,直到水流的动能 E 达不到继续侵蚀或侵蚀、输沙的能量时,水流只流经坡面,

不参与继续侵蚀或侵蚀、输沙或侵蚀、输沙与沉积,达到动态平衡。随着重力势能继续转化为动能,水流将积蓄能量。当水流具有的能量 E 超过了继续侵蚀和输沙所需要的能量时,水流将参与侵蚀和输沙。在坡面上径流的侵蚀产沙、输沙能力随着坡面长度变化的观点与罗来兴^[17]的沿坡长侵蚀呈强弱交替变化的观点一致。

4 降雨、坡度与坡长综合作用对临界坡度与临界坡长的影响分析

4.1 降雨变化对临界坡度、临界坡长的影响

贾志伟等^[20]研究发现,最大 30 min 降雨强度 (I_{30})能很好地刻画降雨对土壤的侵蚀作用,为此,笔者采用安塞水土保持研究站近 5 年的观测数据^[15](表 1 和表 2)进行分析时,也采用 I_{30} 来刻画降雨对不同坡面侵蚀量的影响。

4.1.1 降雨变化对临界坡度大小的影响 安塞水土保持研究站 6 个坡度小区水平投影面积相同(均为 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),因而不同坡度的小区坡面单位面积所分配的降雨量,随着坡度的增加而减小。由理论分析结果可知,坡度对侵蚀产沙的影响具有两面性:

表 1 安塞水土保持研究站不同 I_{30} 条件下不同坡度的次平均侵蚀量

Tab.1 Average erosion modules under different slope gradients and I_{30} conditions in Ansai station

I_{30} (mm·min ⁻¹)	观测 次数	不同坡度的次暴雨平均侵蚀量/(t·km ⁻²)					
		5°	10°	15°	20°	25°	28°
< 0.25	23	11.7	28.8	51.1	62.3	82.6	68.6
0.25 ~ 0.50	9	143.6	302.6	497.9	649.2	817.9	844.2
0.50 ~ 0.75	3	344.4	658.2	1 720.7	1 767.3	2 137.5	2 417.9
> 0.75	4	1 265.8	4 186.8	6 985.6	9 763.6	13 318.1	13 480.0

表 2 安塞水土保持研究站不同 I_{30} 条件下不同坡长的次平均侵蚀量

Tab.2 Average erosion modules under different slope length and I_{30} conditions in Ansai station

I_{30} mm·min ⁻¹	观测 次数	不同坡长的次暴雨平均侵蚀量/(t·km ⁻²)			
		10 m	20 m	30 m	40 m
< 0.25	23	35.2	37.2	31.0	28.1
0.25 ~ 0.50	9	404.1	582.6	468.5	739.9
0.50 ~ 0.75	3	1 548.8	2 159.7	2 062.8	2 729.7
> 0.75	4	9 316.2	12 926.9	14 987.3	16 475.6

一方面,随着坡度的增加,径流势能增加,单位体积径流的侵蚀产沙能力增强;另一方面,由于坡度的增

加,坡面单位面积获得的雨量减少,用于参与侵蚀产沙的径流减小,造成侵蚀量的减小。坡度增加,侵蚀量是增加还是减少,要看哪方面的作用占主导地位。 I_{30} 的增加,增大了单位面积上的径流量,使得侵蚀量增加。

图 2 为不同降雨强度下坡度与坡面侵蚀量的关系图。可以看出:在低强度降雨的情况下,坡面单位面积上分配的降雨比较少,并随着坡度的增大继续减小,从而影响坡面的侵蚀产沙;但当降雨强度增强,在坡面单位面积上因为降雨强度增加的雨量远大于因为坡度增加而减小的雨量。此时坡面侵蚀产沙能力不仅在质上增强,也在量上增加。坡度的增大表现为促进侵蚀量,临界坡度增大。

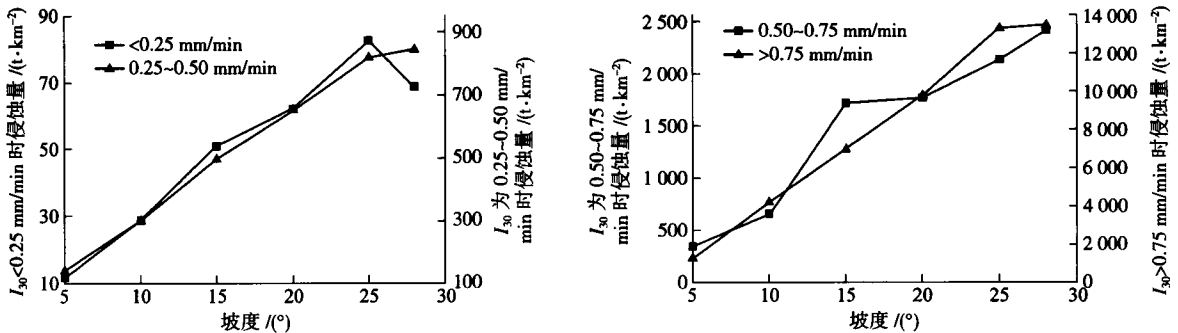


图 2 不同降雨强度下坡度与坡面侵蚀量的关系

Fig.2 Relation between slope gradient and erosion module under different rainfall intensities

当 $I_{30} > 0.25$ mm/min 时,在一定坡度范围内,坡面侵蚀量随着坡度的增加而迅速增大。这说明在降雨强度不是很小的情况下,坡面侵蚀产沙能力的量(坡面单位面积的径流量)是充足的。当坡度增加时,提高了坡面侵蚀产沙能力的质(坡面上单位体积径流的侵蚀产沙能力)。当坡面侵蚀产沙能力在量与质二方面都得到加强时,坡面侵蚀量成倍增加。

当 $I_{30} < 0.25$ mm/min 时,坡面侵蚀产沙能力的量(坡面单位面积的径流量)较小,并随着坡度的增加而减小。随着坡度的增加,坡面侵蚀产沙能力质的增加无法弥补量的不足,坡面侵蚀量将会随着坡

度的增加而减小。当降雨强度较小的情况下,开始侵蚀量随着坡度的增加而增大,但随着坡度的增大,单位面积分配的雨量减小,当坡度增加到 25°后,坡面侵蚀产沙能力质的增加无法弥补量的不足,坡面侵蚀量开始下降。坡面的临界坡度与降雨强度有关,降雨强度的增大,可以使临界坡度在一定范围内增大,这个范围由降雨强度、坡度等因素共同决定。

4.1.2 降雨变化对临界坡长大小的影响 安塞水土保持研究站 4 个坡长小区的坡度均为 30°,可以认为不同小区单位面积上的降雨量是相同的。在降雨强度一定的情况下,坡面侵蚀量的大小随着坡长的

长度而变化。当 I_{30} 较小的时候,随着坡长的增加,入渗量加大,径流深将会减小。坡长增大引起径流重力势能的增大,但增大的势能不能抵消径流量的减小对侵蚀产沙的影响,所以,降雨强度比较小时,当坡长增加到一定长度,坡面侵蚀量将会减小。如果坡长继续增加,坡面径流将有可能不能流到坡底,就出现断流。当 I_{30} 比较大的时候,坡面侵蚀产沙能力的量(坡面单位面积径流量)足够大,这些径流的部分势能转化的动能,能为侵蚀提供足够的能量。当 $E - E_0 > 0$ 时,坡面侵蚀产沙能力增强,坡面侵蚀量将增大。当 $E - E_0 < 0$ 时,径流的能量将沿坡面下降,径流参与坡面侵蚀、输沙的能力变小,坡面侵蚀量将会下降。

图 3 为不同降雨强度下坡长与坡面侵蚀量的关系图。可以看出:当 $I_{30} < 0.25 \text{ mm/min}$ 时,侵蚀量由

大变小的坡长也是 20 m,并且随着坡长的增加继续减小。当 $0.25 < I_{30} < 0.75 \text{ mm/min}$ 时,侵蚀量由大变小的坡长也是 20 m,但由于降雨强度比较大,随着大量的径流重力势能转化为动能,径流的侵蚀能力加强,在坡长为 30 m 的位置,侵蚀量开始随着坡长的增大迅速增大,并随着坡长的增长,坡面侵蚀量出现增大、减小交替变化的情况。当 $I_{30} > 0.75 \text{ mm/min}$ 时,坡面径流的量充足,随着坡长的增长,单位体积径流的势能也增大,侵蚀量将持续增大,虽然在 $I_{30} > 0.75 \text{ mm/min}$ 、坡长小于 40 m 的坡面均未出现随着坡长的增长,侵蚀量增加和减少交替变化的情况,但当坡长持续增加, $E - E_0$ 的量将会出现变化,此时仍然会随着坡长的增加而出现侵蚀量增加和减少交替变化的情况。

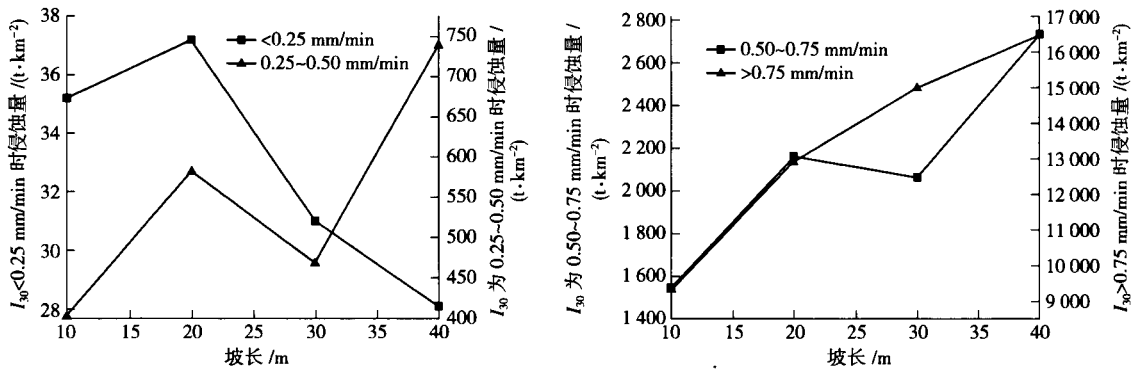


图 3 不同降雨强度下坡长与坡面侵蚀量的关系

Fig.3 Relation between slope length and erosion module under different rainfall intensities

4.1.3 降雨、坡度、坡长变化对坡面侵蚀产沙的影响 通过对表 1 的分析发现:在 I_{30} 不变、坡长小幅度变化时,随着坡度的变化,坡面侵蚀量最大值与最小值比值的平均值为 7.30,最大为 10.60;在坡度、坡长不变的情况下,随着 I_{30} 的变化,坡面侵蚀量最大值与最小值比值的平均值为 150.79,最大为 196.50。通过对表 2 的分析可知:在 I_{30} 一定、坡度不变的情况下,随着坡长的变化,坡面侵蚀量最大值与最小值比值的平均值为 1.67,最大为 1.83;坡度、坡长不变时,随着 I_{30} 的变化,坡面侵蚀量最大值与最小值比值的平均值为 420.50,最大为 586.30。可见, I_{30} 对坡面侵蚀产沙的影响十分明显,即当 I_{30} 变化时,坡面侵蚀量将成倍变化。降雨强度对坡面侵蚀产沙的作用最大,坡度次之,坡长最小。

4.2 坡度、坡长、降雨共同作用下的临界坡长和临界坡度

4.2.1 三维状态下坡面侵蚀产沙研究 为了研究

坡度、坡长、降雨共同作用下的临界坡长与临界坡度,选择了晋西离石县王家沟小流域的 14 个径流小区数据。根据数据分析,这 14 个小区无论是降雨时间、降雨量、降雨强度均基本一致(表 3)。由于植被年季变化对坡面侵蚀产沙有影响,为了保证下垫面的一致性,选择了月份比较接近的 4 场降雨。坡度、坡长、降雨共同作用下的坡面侵蚀情况如表 4 所示。

表 3 王家沟小流域次降雨情况

Tab.3 Characteristics of rainfall events in Wangjiagou small watershed

日期	降雨量	持续时间	降雨强度
	mm	h	mm·h ⁻¹
1964-08-13	16.3	1.00	16.30
1964-09-06	80.0	12.67	6.31
1966-07-17	62.0	4.16	14.90
1966-08-13	48.2	3.00	16.10

表 4 王家沟小流域不同坡度、坡长、降雨条件下的坡面侵蚀量

Tab.4 Erosion modules at different slope gradient, slope length and rainfall conditions in Wangjiagou small watershed

坡度 (°)	坡长 m	侵蚀量/(t·km ⁻²)			
		(1964-08-13)	(1966-08-13)	(1964-09-06)	(1966-07-17)
5	20	51.2	120.0	438.0	9 661.0
10	20	147.5	611.7	160.0	5 765.0
13	70	49.2	225.3	1 260.0	4 150.0
15	20	1 525.0	485.0	2 221.0	3 060.0
17	105	947.2	5 428.8	1 251.0	19 127.3
20	20	2 028.0	834.0	1 615.0	1 125.0
25	20	1 080.0	680.0	596.6	522.0
29	40	1 500.0	1 806.7	1 866.0	7 040.0
29	50	1 761.4	17 520.6	706.3	11 587.3
29	60	3 472.2	650.0	757.0	5 450.0
30	20	2 783.3	190.0	6 010.0	6 350.0
31	10	1 193.0	857.0	470.0	3 100.0
32	40	941.9	4 447.3	4 755.4	26 026.0
36	90	358.9	2 862.2	3 760.7	20 650.0

图 4 为不同次暴雨条件下坡面侵蚀量随着坡度、坡长变化的三维曲面图。

由图 4(a)可以看出：最大侵蚀量发生在坡度为

29°、坡长为 60 m 的径流小区。当坡度大于 26°时，侵蚀量明显增大，到 29°时达到最大值。从坡长看，出现了 3 个侵蚀加强带（侵蚀量随着坡长的增大而增加的坡长区间），2 个侵蚀减弱带（侵蚀量随着坡长的增大而减小的坡长区间），当坡度大于 29°时，3 个侵蚀加强带分别为坡长 10~22 m、40~60 m、90~105 m。

由图 4(b)可以看出：最大侵蚀量发生在坡度为 30°、坡长为 20 m 的径流小区。从坡度坐标看，当坡度大于 29°时，坡面可能发生细沟侵蚀，导致侵蚀量急剧增加。从坡长看，出现了 2 个侵蚀加强带，2 个侵蚀减弱带，当坡度大于 29°时，2 个侵蚀加强带分别为 10~22 m、55~95 m。

由图 4(c)可以看出：坡面最大侵蚀量发生在坡度 29°、坡长为 50 m 的径流小区。当坡度大于 29°，坡长在 36~50 m 的区域内也存在一个侵蚀量急剧增加的区间。从坡长看，分别出现了 2 个侵蚀加强带，1 个侵蚀减弱带。

由图 4(d)可以看出：坡面最大侵蚀量发生在坡度为 32°、坡长为 40 m 的径流小区，从坡长坐标看，分别出现了 2 个侵蚀加强带和 1 个侵蚀减弱带。

4.2.2 降雨、坡度、坡长关系的分析 由图 4 可以看出：在不同降雨情况下，土壤侵蚀产沙发生了很大

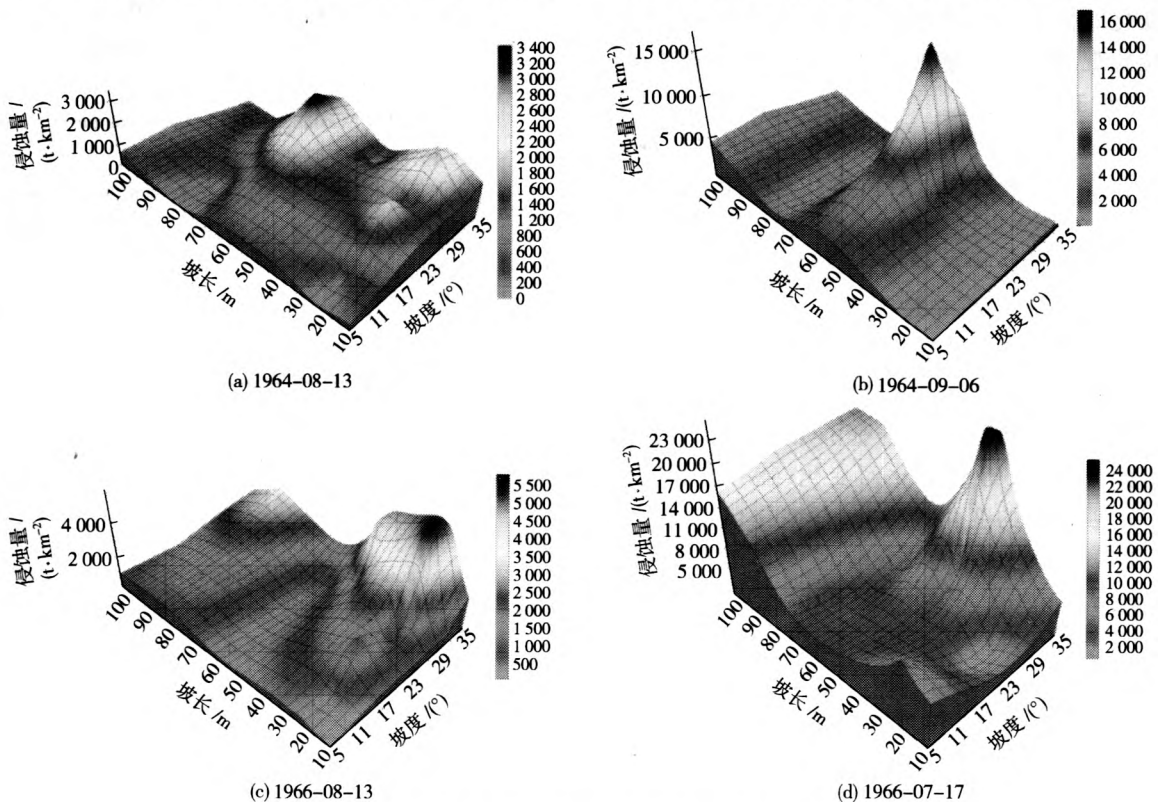


图 4 不同次暴雨条件下坡面侵蚀量随坡度、坡长的三维变化

Fig.4 3-Dimensional change of erosion module of the single rainfall events under dissimilar slope gradient and slope length

变化,坡面侵蚀加强或减弱带也随之发生变化。坡面土壤的侵蚀量是由单位面积上的雨量与单位体积雨量的能量(雨滴溅蚀的动能、地表径流的动能、势能)共同决定。单位面积的雨量,由坡度与降雨决定,单位体积雨量的能量,由坡度、坡长、降雨决定,所以,次暴雨坡面侵蚀量随着坡度、坡长、降雨的变化而变化,坡面的临界坡长的大小由该坡面的坡度、坡长、降雨等共同决定,坡面的临界坡度由该坡面上的降雨、坡长等共同决定。由图4还可以发现,坡面的临界坡度、临界坡长不是一个固定的值,但存在一定的范围。由于坡度与坡长对坡面侵蚀产沙作用的大小不同,临界坡长的变化范围比较大,临界坡度的变化范围比较小。由图4及式(4)可知,土壤的侵蚀能力随着坡长的变化将出现侵蚀量增大、减小周期变化的情况,且变化情况与降雨条件联系紧密。

5 结论

1) I_{30} 对坡面侵蚀产沙的影响十分明显,当 I_{30} 变化时,坡面侵蚀量将成倍变化。降雨特性对坡面侵蚀产沙的作用最大,坡度次之,坡长最小。

2) 在 I_{30} 比较大的情况下,坡面上径流的侵蚀、输沙能力随着坡长的增长而出现侵蚀量增大、减小周期变化的情况。如果坡长足够长,则可以在不同坡长位置观测到侵蚀量随着坡长的增大呈现增大、减小、不变3种情况。

3) 坡度、坡长、降雨对坡面侵蚀产沙的影响最终表现在单位面积坡面上径流所具有的能量。当径流量增大,单位体积径流的动能增大时,坡面的侵蚀量一定增大。当径流量增大,单位体积径流的动能减小或者径流量减小,单位体积径流的动能增大时,坡面侵蚀量的变化主要决定于使侵蚀量增加的作用是不是大于使侵蚀量减小的作用。

4) 临界坡度与临界坡长都不是定值,临界坡度会随着降雨、坡长等的变化而变化,临界坡长受降雨、坡度、坡长等的变化而变化,但变化存在一定的范围,临界坡度的变化范围比较小,临界坡长的变化范围比较大。

6 参考文献

[1] 陈永宗,景可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理.北京:科学出版社,1988

- [2] Carson M A, Kirkby M J. Hillslope Form and Process. Cambridge: Cambridge University Press, 1972
- [3] 席有. 坡度影响土壤侵蚀的研究. 中国水土保持, 1993 (4): 19-21
- [4] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度. 地理学报, 1995, 50 (3): 234-239
- [5] Morgan R P C. Soil erosion and conservation. U K: Longman Group, 1986
- [6] 蔡强国. 坡长对坡耕地侵蚀产沙过程的影响. 云南地理环境研究, 1998, 10(1): 34-43
- [7] 夏卫生, 雷廷武, 赵军. 坡面侵蚀动力学及其相关参数的探讨. 中国水土保持科学, 2003, 1(4): 16-19
- [8] 赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 等. 再论土壤侵蚀的坡度界限. 水土保持研究, 1999, 6(2): 42-46
- [9] 王玉宽. 黄土丘陵沟壑区坡面径流侵蚀实验研究. 中国水土保持, 1993 (7): 22-24
- [10] 郑粉莉. 发生细沟侵蚀的临界坡长与坡度. 中国水土保持, 1989 (8): 23-24
- [11] 李全胜, 王兆骞. 坡面承雨强度和土壤侵蚀临界坡度的理论探讨. 水土保持学报, 1995, 9(3): 50-53
- [12] 黄志霖, 傅博杰, 陈利顶. 黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异. 中国水土保持科学, 2005, 3(4): 11-18
- [13] 张金池, 庄家尧, 林杰. 不同土地利用类型土壤侵蚀量的坡度效应. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 6-9
- [14] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. Washington D C: U S Department of Agriculture, 1978
- [15] 江忠善, 刘志, 贾志伟. 地形因素与坡地水土流失关系的研究. 中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊, 1990(12): 1-8
- [16] 西北黄河工程局. 西北黄土区坡地固体径流和液体径流形成过程的初步分析. 黄河建设, 1957 (12): 17-21
- [17] 罗来兴. 甘肃华亭粮食沟坡侵蚀量的野外观测及其初步分析结果. 地理学资料, 1958 (2): 111-118
- [18] King L Y. The uniformitarian nature of hillslopes, Trans. edin. Geod. Soc., 1957 (17): 81-122
- [19] Schumm S A, Mosely M. Slope morphology. Stroudabury Pennsylvania: Dowden, Huthinson and Ross. Inc, 1973
- [20] 贾志伟, 江忠善, 刘志. 降雨特征与水土流失的研究. 中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊, 1990 (12): 9-15

(责任编辑:宋如华)