

坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究

吴普特 周佩华 武春龙 郑世清 李雅琦 琚彤军

(中国科学院水土保持研究所 陕西杨陵 712100)
水利部

摘要 基于土壤侵蚀REE示踪法的技术需要,对全坡长小区细沟侵蚀垂直分布特征进行了分析研究。在野外实地量测的基础上,首先提出了表征细沟侵蚀形态、强度的三个参数,即细沟平面密度(μ)、细沟平均深度(\bar{H})及细沟侵蚀强度(EI),并对上述参数垂直变化特征进行了分析、计算,最后分析了全坡长小区细沟相对侵蚀量在垂直方向上的变化,初步得出细沟侵蚀强烈地段在坡面的中下部位,约占坡面细沟侵蚀总量的70%以上。

关键词 细沟侵蚀 细沟侵蚀强度 垂直分布

Research on the Spatial Distribution Characteristics of Slope Rill Erosion

Wu Pute Zhou Peihua Wu Chunlong Zheng Shiqing Li Yaqi Ju Tongjun

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences
and Ministry of Water Resources Yangling Shaanxi 712100)

Abstract Based on the need of soil erosion rare earth element (REE) tracer method, the rill erosion spatial characteristic was researched on the field plot. At first, we give three parameter to show the rill erosion intensity and its shape, that is rill horizon density (μ), rill average depth (\bar{H}) and rill intensity (EI), then we calculated the all parameters. Finally, we researched the relationship between the related erosion yield with the slope length. The results showed that the serious position of rill erosion is on the middle and down of slope. It is about 70% of totall rill erosion yield.

Key words rill erosion rill erosion intensity spatial distribution

1 概述

以往研究结果表明,坡面细沟侵蚀量约占其总侵蚀量的60%~80%,甚至更高,从这种意义上理解,坡面细沟侵蚀在垂直方向上的强度分布亦可以近似表征坡面侵蚀垂直分布趋势。如果我们求出坡面细沟侵蚀强度在垂直方向上的分布特征,无疑对坡面侵蚀垂直分布规律

的研究有一定的帮助和重要的参考价值。事实上,细沟侵蚀产沙量在总侵蚀量中的比重,已经确立了它在坡面侵蚀研究中的重要地位与作用。REE 示踪法作为一种新的土壤侵蚀研究方法,它的实施和完善必将以以往土壤侵蚀的研究结果做为基础,例如 REE 施放浓度、施放量的计算就是以研究对象及 REE 代表区域的侵蚀量做为依据的,然而这种量正是我们期望通过 REE 示踪法所求的未知数。按 REE 示踪法的技术要求,在计算所研究的区域 REE 施放浓度与施放量时,应对研究区域的可能侵蚀量进行估算,如果欲研究坡面侵蚀垂直分布规律,就得预先对其可能存在的规律及其侵蚀强度的分布有一个大致的了解。特别是当采用条带法施放 REE 示踪元素时,元素施放条带的正确位置应该是该处的侵蚀强度等于条带所代表区域的平均侵蚀强度,在确定该位置时首先遇到的问题就是要对坡面不同部位侵蚀强度及其变化趋势有一个相对准确的了解。

基于上述考虑,我们对坡面细沟侵蚀垂直分布特征进行了专门研究,其目的一方面为 REE 示踪法元素施放量、施放浓度的计算提供依据,另一方面亦可做为坡面侵蚀垂直分布特征研究的参考资料,对 REE 示踪法所得到的研究结果进行佐证。

2 研究方法

2.1 研究对象及量测方法

研究对象选定在水土保持研究所安塞生态站山地全坡长小区,小区斜坡面积为 $5\text{m} \times 113\text{m}$,其中小区宽度为 5m ,斜坡长 113m ,平均地表坡度为 27° ,土壤为黄绵土,坡面为裸露地面。每次降雨结束后,在现场对坡面细沟侵蚀形态、分布状况进行实地量测。量测项目包括细沟所在平面位置(x, y)坐标、细沟的宽度及深度。在实地量测时,从每条细沟的发生点开始,沿细沟发展趋势逐段量测,考虑到细沟断面的非规则性,为了便于计算,所有细沟断面均按矩形断面考虑,但在量测细沟参数的过程中,考虑了矩形断面的误差因素。根据细沟断面形状的差异,宽度参数分别以细沟内缘线,或者细沟断面矩形化后的虚拟线为边界进行量测,尽量减少断面矩形化后所带来的误差。同时整个测量过程由一个人实施完成,避免量测过程中所带来的人为累积误差。将所量测过程点绘在方格纸上,首先按照一个比例尺画出细沟平面分布图,然后按斜坡长 1m 做为计算单元,即每单元计算面积为 $1\text{m} \times 5\text{m} = 5\text{m}^2$,单元计算面积乘以细沟深度即为该单元内细沟侵蚀的体积,并以此做为计算细沟侵蚀相对产沙量以及分析细沟侵蚀垂直分布特征的依据。

2.2 几个参数的物理概念及计算方法

为了便于研究细沟侵蚀垂直分布特征,在具体分析研究之前,我们首先提出几个表征细沟侵蚀形态、侵蚀强度的参数,并在界定所提参数物理意义的基础上,给出其计算方法。

2.2.1 细沟平面密度(μ) 细沟在坡面上的分布状况是描述细沟侵蚀形态、侵蚀强度的重要参数,由于细沟产生的复杂性及特殊性,很难利用单个细沟的平面形态特征去对几个不同区域的细沟分布状况进行比较,但细沟的分布状况往往是研究者极为关心的问题。为此我们提出细沟平面密度概念,其物理意义为研究区域内所有细沟平面面积之和与所对应研究区域平面面积的比值,用 μ 表示。该参数为一无量纲数,在研究区域面积相等的情况下, μ 越大,说明细沟发育较强,反之,则细沟发育较差。

对于某一给定研究区域,若令其平面面积为 A_0 ,区域内不同细沟的平面面积分别为 $A_i, i = 1, 2, \dots, n, i$ 为自然数,表示研究区域内的细沟数目,则细沟平面密度 μ 可表示为:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A_o} \quad (1)$$

式(1)即为细沟平面密度的计算式。

2.2.2 细沟平均深度(\bar{H}) μ 仅仅能够表示研究区域内产生细沟的面积占区域总面积的比值,说明研究区域内细沟的分析状况; μ 值大,只能说明某一区域内产生细沟的面积大,细沟发育较强,但并不能说明该区域内所产生的细沟侵蚀量就大。因为细沟侵蚀强度不仅与细沟的平面面积有关,而且与细沟的侵蚀深度也有关系,侵蚀量是面积与侵蚀深度的函数。为此我们提出细沟平均深度的概念,并定义它为研究区域内所有细沟侵蚀深度的加权平均值,用 \bar{H} 表示,其量纲为(L)。

同样令研究区域内所有细沟的平面面积分别为 A_i ,其对应的细沟深度为 $h_i, i=1,2,\dots,n$, n 为研究区域内所有细沟的总条数,则可用下式对细沟平均深度进行计算。

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

2.2.3 细沟侵蚀强度 EI 细沟侵蚀垂直分布特征的研究,除了回答细沟侵蚀形态、分布状况等在垂直方向上的变化趋势之外,更重要的则是要回答细沟侵蚀强度在垂直方向上的变化状况,这往往亦是一般人所关注的问题,更是REE示踪法实施时必须了解的问题。为了便于比较不同研究区域内细沟侵蚀的变化状况,我们提出细沟侵蚀强度概念,并定义它为研究区域内单位面积上所产生的细沟侵蚀量。用 EI 表示,其量纲为 $[\frac{M}{L^2}]$, EI 越大,说明所产生的细沟侵蚀量越大,反之则较小, EI 可用下式进行计算:

$$EI = \frac{r_s \sum_{i=1}^n A_i h_i}{A_o} \quad (3)$$

式中 r_s 为坡面土壤容重,由于我们研究的目标是细沟侵蚀垂直分布特征,以及细沟侵蚀强度在垂直分布特征,以注重相对侵蚀量的概念,而不着意强调绝对量的概念。为了计算方便,我们取 $r_s=1.0$,于是式(3)可简化为:

$$EI = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{A_o} \quad (4)$$

这样即可利用式(4)对 EI 进行简化计算。

μ, \bar{H} 是描述细沟侵蚀形态及分布状况的参数,任何一个参数都无法单独描述细沟侵蚀的强度,但二者的综合则决定了细沟侵蚀强度,事实上取 $r_s=1.0, \mu, \bar{H}$ 的乘积就是 EI 。

$$\mu \cdot \bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{A_o} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{A_o} = EI$$

这样 μ, \bar{H}, EI 三个参数就比较全面地描述了研究区域内细沟的形态、分布以及侵蚀强度。

3 结果分析

在 1994~1995 年之间,共分别量测了 4 次降雨细沟侵蚀资料,该 4 次降雨特征如表 1 所示。

表 1 为量测细沟的 4 次降雨特征参数,以该 4 次降雨侵蚀细沟量测资料做为依据,分别就其细沟侵蚀的几个主要参数 μ 、 \bar{H} 、 EI 的变化状况进行分析,在此基础上,初步提出细沟侵蚀的垂直分布特征。

表 1 降雨特征

降雨时间 (年.月.日)	历时 (min)	降雨量 (mm)	平均雨强 (mm/min)	最大 30min 雨强 (mm/min)
1994-08-05	202	20.1	0.10	0.43
1994-08-10~11	500	39.5	0.07	0.69
1994-08-31		50.1		0.80 *
1995-08-05	590	42.6	0.07	0.51

备注: * 为 10min 最大雨强。

3.1 细沟平面密度垂直分布特征

按照式(1)在 4 次降雨细沟量测的基础上,分别计算出其细沟平面密度 μ ,做出 μ 在坡面垂直方向上的变化趋势图,即 μ 随坡长的变化关系。4 次降雨状况下, μ 随坡长的变化经趋势分别如图 1、图 2、图 3、图 4 所示。由图中可明显看出, μ 随坡长的变化非常复杂,概括起来,可初步看出下列趋势。

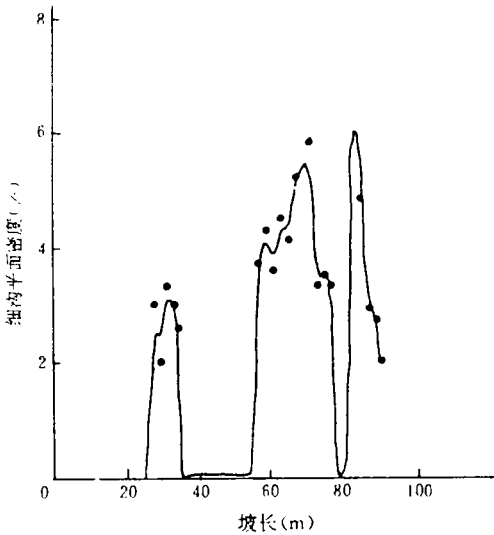


图 1 细沟平面密度垂直分布趋势
(1994-08-05)

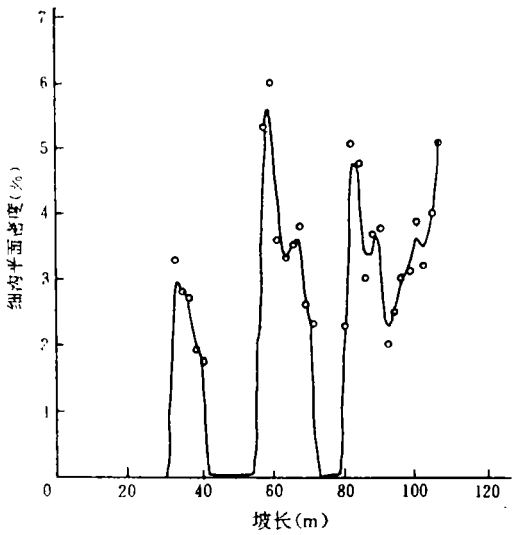


图 2 细沟平面密度垂直分布趋势
(1994-08-10~11)

(1)细沟产生在距坡顶一定位置处,对于我们研究的全坡长小区,该距离大约在距坡顶 25~30m 处,大约在坡面上部 $1/4 L$ 处。

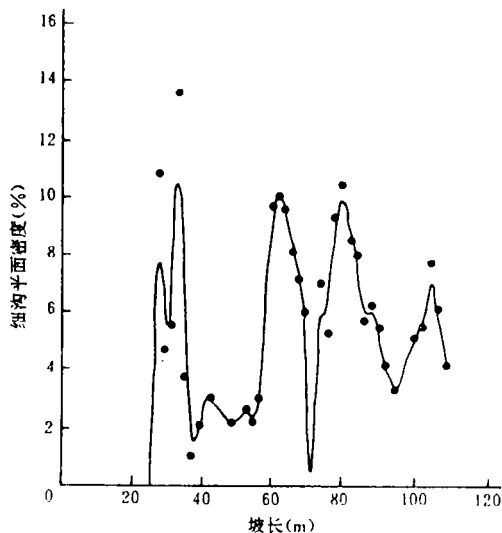


图3 细沟平面密度垂直分布趋势
(1994-08-31)

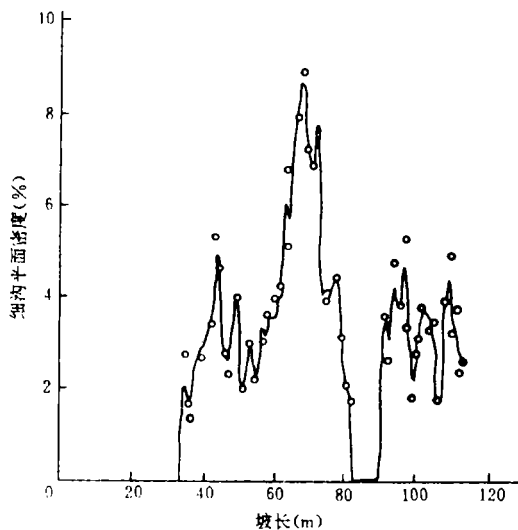


图4 细沟平面密度垂直分布趋势
(1995-08-05)

(2)细沟平面密度与雨量、雨强均有密切关系,一般来讲,雨量、雨强较小,则细沟密度较小,如1994年8月5日与8月10~11日两场降雨细沟平面密度分布曲线图所示;雨量、雨强较大,则细沟密度较大,如1994年8月31日与1995年8月5日两场降雨所反映的情况。

(3)细沟从产生点起,到消失为止,整个过程细沟平面密度 μ 的变化,是一个从增大到减小的变化趋势, μ 开始随坡长增大,增加到一定程度后反而减少,在整个变化过程中这种趋势交替出现,最终 μ 减少为零,即细沟平面密度在垂直方向上的变化呈多峰变化趋势。

(4)细沟密度较大地段,即细沟发育强烈地段大致在全坡长小区的中部,大约即坡顶60~80m处,即 $1/2 L$ 处,其次为下部与上部,这一现象似乎与雨量、雨强关系不太密切。

细沟的产生源于坡面径流的汇集,并依靠径流的冲刷作用“刻划”坡面,最终产生细沟,做为坡面径流汇集区,形成股流通道,因此坡面细沟的产生其首要前提则是径流的汇集作用,且这种作用要达到一定程度,足可以在坡面上“刻划”出一定的几何形状。从这种意义上理解,坡面细沟的产生总是在距坡顶一定距离处,这段距离正是径流汇集作用产生的场所,距离的大小与雨强及下垫面条件均有关系,但二者相比下垫面条件影响作用较大,要产生细沟,首先坡面必须有径流现象发生,因而一般能产生细沟的雨强都比较大,小雨强即使坡面可以产流,但由于其径流强度相对较小,远不具备这种动力条件,具备这种动力条件的雨强所产生的径流冲刷作用首先要克服掉坡面土壤阻止其“形态”发生变化的阻力。下垫面条件不仅影响坡面产流而且直接影响径流的冲刷作用,在雨强相同的情况下,坡面是否产生细沟,在何处发生,均与下垫面条件有直接关系,但对于特大暴雨,情况则会更复杂。

雨强、雨量较大,则径流强度及汇流作用在下垫面条件相同的状况下,相对强烈,产生细沟的概率随之增大,于是细沟平均密度增强。细沟平面密度垂直变化呈多峰趋势则主要与坡面泥沙搬运过程有关,细沟产生初期发育强烈,此时径流的冲刷作用主要用于“刻划”地表、产生侵

蚀之上,由于细沟侵蚀刚刚开始,搬运物质较少,因而其侵蚀搬运能力亦就相对较大;在径流搬运过程中细沟侵蚀量随之增大,但坡面径流的搬运物质愈来愈多,水沙二相流的浓度愈来愈大,此时径流冲刷动力大部分消耗在侵蚀泥沙搬运上,侵蚀能力相对减少,细沟发育程度相对降低;一旦径流搬运物质达到其径流挟沙能力时,整个径流动力将全部用于泥沙搬运,而产生侵蚀冲刷的动力为零,于是细沟终止,正如图 1、2、3、4 中所反映的现象。至于 μ 最大值主要分布在坡面中部距坡顶 60~80m 处,且与降雨特征无关,其主要原因与该段土壤容重有关,我们研究的全坡长小区中部距坡顶 60~80m 处为修建小区时的垫方段,土壤容重较小,易产生细沟,加之又在坡面中部,汇流作用强烈,二者共同作用所致。

3.2 细沟平均深度垂直分布特征

4 次降雨条件下,细沟平均深度(\bar{H})垂直分布变化趋势如图 5、6、7 及 8 所示,由图中可大概看出下列趋势。

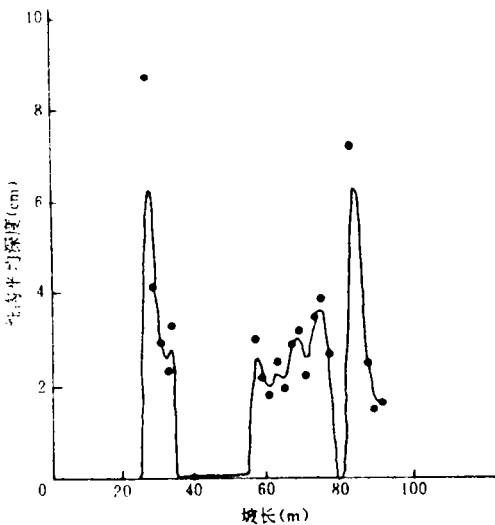


图 5 细沟平均深度垂直分布趋势
(1994-08-05)

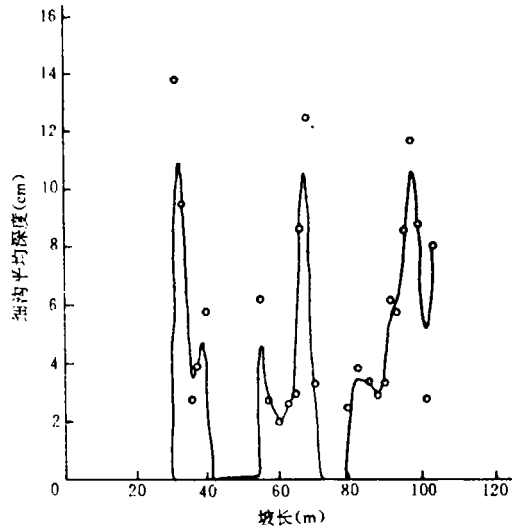


图 6 细沟平均深度垂直分布趋势
(1994-08-10~11)

- (1)细沟平均深度垂直分布呈多峰变化趋势。
- (2)细沟平均深度变化与雨量、雨强关系密切,雨量大,雨强高,则 \bar{H} 大,反之,则较小。
- (3)细沟平均深度垂直分布变化趋势很可能与降雨雨型有关,如 1995 年 8 月 5 日降雨, \bar{H} 与坡长之间近似为直线关系,而其它次降雨这一现象则不很明显,这一问题留待今后进一步研究。

细沟平均深度(\bar{H})垂直分布变化呈多峰趋势,与 μ 呈多峰分布趋势一样,亦是与坡面侵蚀搬运过程有关。细沟的发育不单是指平面发展,即细沟的扩展,同时亦有下切作用,向深度方向发展。细沟产生点,由于“微形跌水”的形成,汇流作用强烈,径流强度与侵蚀冲刷下切力均大,于是 \bar{H} 亦就增大。但随着细沟沿水流方向的延伸,侵蚀物质愈来愈多,水沙二相流的浓度愈来愈高,径流的大部力量将用于搬运泥沙,用于侵蚀下切的冲刷动力相对减少,于是 \bar{H} 就

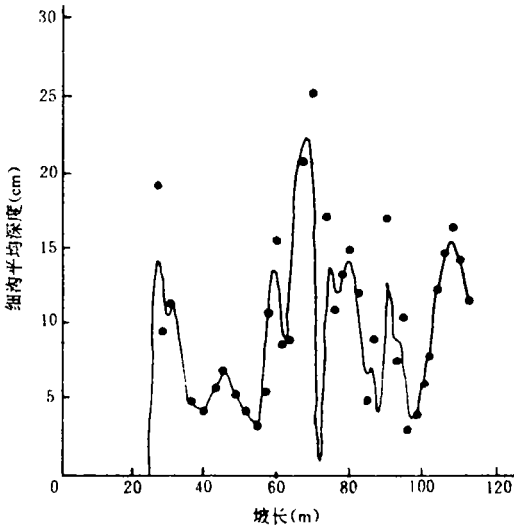


图 7 细沟平均深度垂直分布趋势
(1994-08-31)

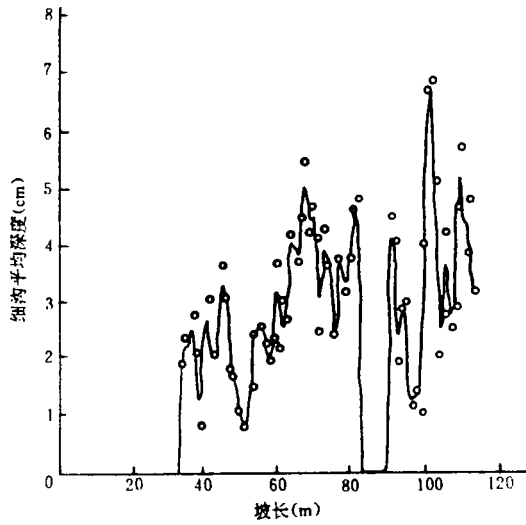


图 8 细沟平均深度垂直分布趋势
(1995-08-05)

小。同理当水沙二相流浓度达到水流挟沙能力时,侵蚀下切的径流冲刷动力减至为零,此时将不在发生细沟侵蚀, $\bar{H} = 0$, 细沟亦随之终止。

雨量大,雨强高,则产流、汇流作用均较强,二者共同作用的结果,产生细沟的概率就高,一旦细沟形成,随着降雨的不断进行,产流、汇流的继续,细沟侵蚀愈来愈强烈,势必其深度在增强,但仍存在多峰趋势。至于雨型与 \bar{H} 的关系因本次缺乏雨型资料,将留在以后专门进行讨论。

3.3 细沟侵蚀强度垂直分布特征

图 9,10,11 及 12 分别为 4 次降雨条件下,细沟侵蚀强度垂直分布趋势图。由于图中可明显看出,细沟侵蚀强度垂直分布变化不但呈多峰趋势,而且亦有随雨强、雨量而增加的趋势,与细沟平面密度 (μ) 及平均深度 (\bar{H}) 分布趋势有类似情况。

在讨论了细沟平面密度 (μ)、细沟平均深度 (\bar{H}) 垂直分布特征及变化趋势后,对于细沟侵蚀强度 (EI) 的这种变化趋势不难理解。事实上后者正是前两者的乘积,即 $EI = \mu \cdot \bar{H}$, EI 随坡长的变化趋势取决于 μ, \bar{H} 随坡长的变化,由于 μ, \bar{H} 均有着这种变化特征, EI 的变化趋势亦就只能如此,这里不在多叙。值得强调的是 EI 这种变化趋势,与全坡长小区总侵蚀量随坡长变化有类似情况。

3.4 不同地形部位相对侵蚀量比较分析

分别经全坡长小区四周边界及 REE 施放条带为界,可将基划分为 7 个区域,以不同次降雨细沟侵蚀强度垂直分布曲线为依据,即可分别计算出次降雨细沟侵蚀总量 W 及 W_i ($i=1, 2, \dots, 7$)。

$$\text{令 } \beta_i = \frac{W_i}{W} \times 100\% (i = 1, 2, \dots, 7) \tag{5}$$

β 为某一区域的相对细沟侵蚀量,实际上就是该区域细沟侵蚀量与全坡长小区细沟侵蚀总量的比值,亦就是前者对后者的贡献,计算结果如表 2 所示。

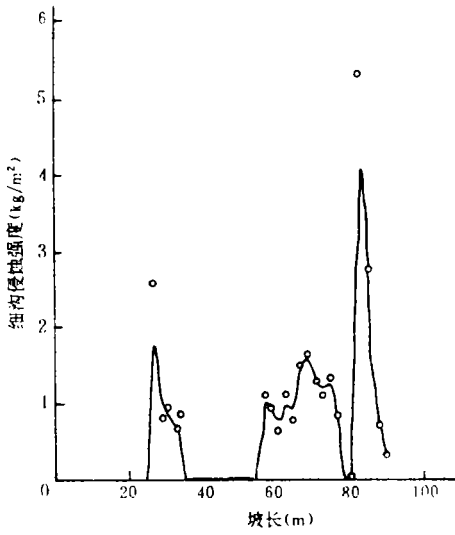


图 9 细沟侵蚀强度垂直分布趋势
(1994-08-05)

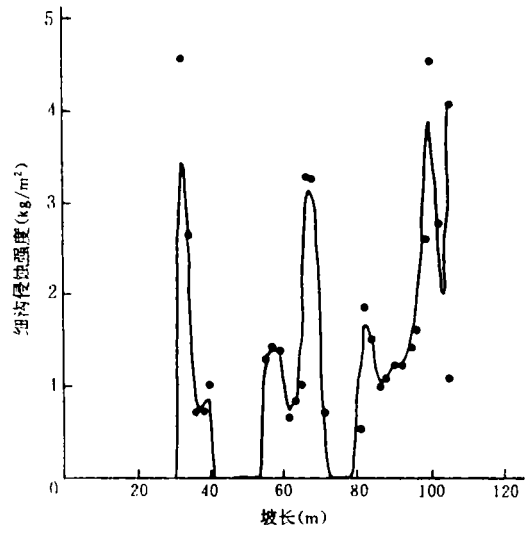


图 10 细沟侵蚀强度垂直分布趋势
(1994-08-10~11)

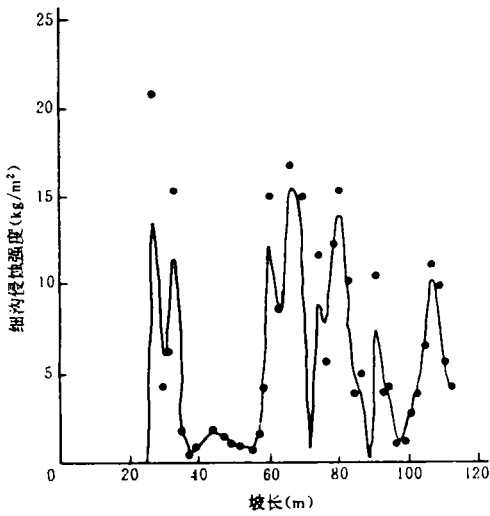


图 11 细沟侵蚀强度垂直分布趋势
(1994-08-31)

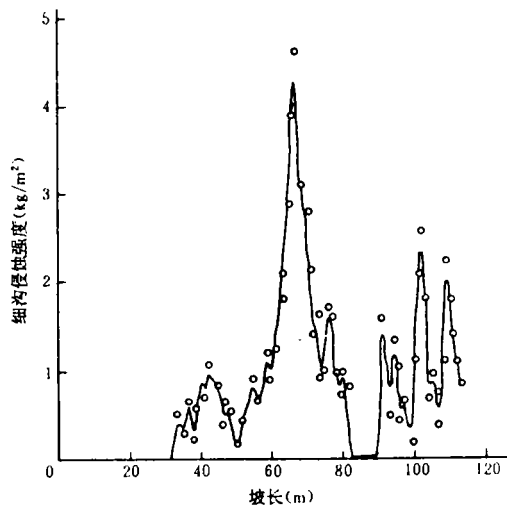


图 12 细沟侵蚀强度垂直分布趋势
(1995-08-05)

表 2 相对细沟侵蚀量计算结果

降雨时间 (年-月-日)	区域位置(距坡顶距离 m)						
	0~16	16~37	37~55	55~72	72~90	90~107	107~113
1994-08-05	0	20.24	0	34.00	46.00	0	0
1994-08-10~11	0	15.74	3.42	27.36	13.86	38.63	0
1994-08-31	0	17.69	3.78	30.73	25.59	14.78	7.42
1995-08-05	0	1.30	11.92	42.33	13.74	20.78	9.92

为了更直观地看出全坡长小区不同部位细沟侵蚀对小区细沟侵蚀总量的贡献大小,以表

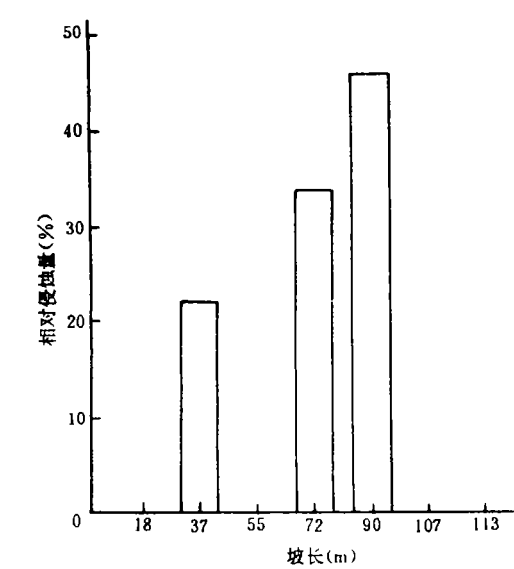


图 13 相对侵蚀量变化趋势
(1994-08-05)

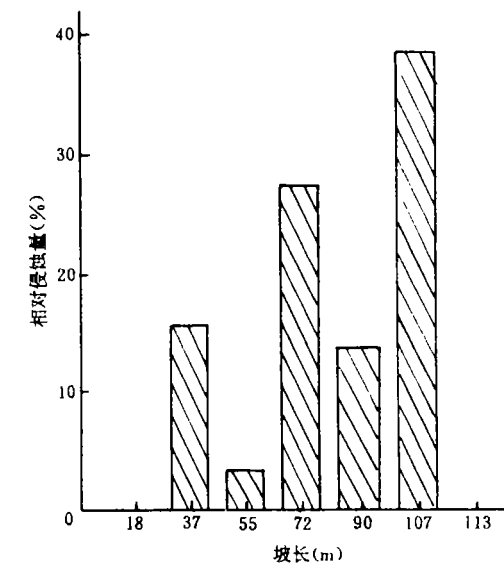


图 14 相对侵蚀量变化趋势
(1994-08-10~11)

2 计算结果做为依据;将其以直方形图的形式反映出来,如图 13、14、15 及 16 所示。由图可明显看出,细沟侵蚀主要产沙区集中在坡面的中、下部位置,距坡顶 55~107m 之间,即 $0.5L \sim 0.95L$ 处,该部分产沙量约占总产沙量的 70%~80%;其次为距坡顶 16~55m 之间,即 $0.14L \sim 0.5L$ 处,该部分产沙量约占总产沙量的 10%~20%;距坡顶 107~113m 之间,即 $0.95L \sim 1.0L$ 处,其产沙量不超过总产沙量的 10%。根据我们所量测的 4 次降雨细沟资料,在 $0.5L \sim 0.95L$ 处,其产沙量分别占总产沙量的 80%、79.85%、71.1%及 76.85%; $0.14L \sim 0.5L$ 处,其产沙量分别占总产沙量的 20.24%、19.16%、18.47%及 13.22%; $0.95L \sim 1.0L$ 处,其产沙量分别占总产沙量的 0,0,7.42%及 9.92%。

4 结 论

上述分析研究表明:

(1)细沟产生在距坡顶一定距离处,对于我们研究的坡面,该距离为 25~30m 之间;细沟平面密度(μ)与雨强、雨量均有关系,但与雨强关系较为密切;细沟从产生点起,到终止为止,

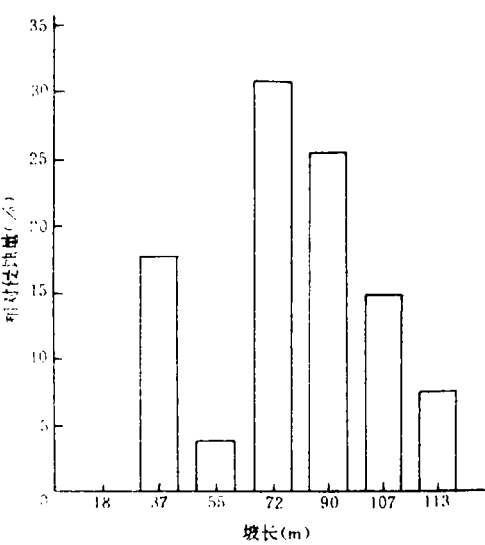


图 15 相对侵蚀量变化趋势
(1994-08-31)

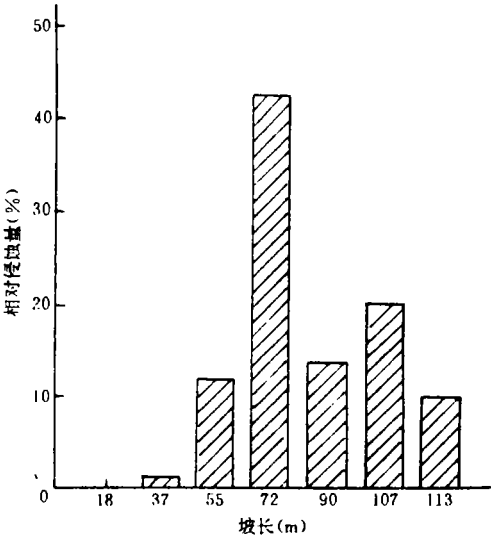


图 16 相对侵蚀量变化趋势
(1995-08-05)

整个过程 μ 的变化是一个从增加到减少的往复变化过程;同时 μ 较大地段,即细沟发育强烈地段大致在坡面的中部,大约距坡顶 60~80m 处,这主要与坡面汇流及细沟侵蚀方式有关。

(2)细沟平均侵蚀深度垂直变化呈多峰趋势,且与降雨有关,雨强大、历时长,则 \bar{H} 愈大,反之 \bar{H} 则愈小。

(3)细沟侵蚀产沙强烈地段,在坡面的中、下部,即 $0.5L \sim 0.95L$ 处,约占细沟侵蚀产沙总量的 70%~80%;其次为上部,即 $0.14L \sim 0.5L$ 处,约占细沟侵蚀产沙总量的 13%~20%;细沟侵蚀产沙强度最弱处在坡面下部,即 $0.95L \sim 1.0L$ 处,其侵蚀产沙量不超过细沟侵蚀产沙量的 10%。

参考文献

1 朱显谟.黄土高原水蚀主要类型.水土保持通报,1982,3~4
2 田均良,周佩华等.土壤侵蚀 REE 示踪法试验研究初报.水土保持学报,1992,3