

坡地侵蚀平面形态的研究*

王协康 方 铎

(四川联合大学高速水力学国家重点实验室,成都,610065)

摘 要 伴随着坡面上产流、产沙过程,坡面形态亦在经历一个迅速变化的过程。本文利用随机理论和分形几何学方法,对坡地侵蚀实验资料进行分析,以坡面细沟密度指标及沟系分维数对坡地侵蚀的平面形态进行了定量描述。为研究坡地侵蚀程度提供了一种新的判定方法。

关键词 坡面形态 随机理论 分形几何学 细沟密度 分维数

随着人口增长及工业化进程的加快,土壤侵蚀问题愈来愈为世界各国所关注。按发生的部位,可分为细沟侵蚀(rill erosion)、沟道侵蚀(gully erosion)和河槽侵蚀(channel erosion)。一般情况下,河槽侵蚀对流域产沙量而言,所占的泥沙量较少,而且人们对河槽侵蚀过程的认识比细沟侵蚀和沟道侵蚀要完善得多。在坡地侵蚀过程中,细沟侵蚀占有相当大的比重,因此,沟系就成为倍受关注的课题,尤其是细沟侵蚀的研究。陈浩等^[1]通过实验将坡地上的产沙分为溅蚀、表土结皮形成、结皮破坏、细沟发育阶段,得出细沟发育阶段侵蚀量最大。

目前,对坡面侵蚀形态过程的研究较少。本文以坡面细沟的微地貌结构及其沟系的发育程度为研究对象,利用随机理论和分形几何学的方法,对坡面侵蚀的几何形态加以定量描述,从坡面细沟微地貌结构的复杂程度来分析坡面土壤侵蚀的程度,为水土保持的治理工作提供有力的依据。

1 坡面细沟微地貌结构的分析

流域坡地由于其地貌结构和土壤抗蚀性的差异,部分水流相对集中进入一些微细沟道,形成集中水流,从而增加了对坡面土壤的侵蚀。这种微细沟道被称为细沟(rill)。陈永宗^[2]在研究黄河中游黄土丘陵区沟谷分类时,认为细沟为坡地初期侵蚀沟,坡地上细沟出现的临界距离为4~12 m,且主要集中在7°~11°的坡上。在这一范围,细沟出现的机率为90%以上。由于坡面细沟的出现,改变了坡面水流的水力特性。杨等(Yong et. al.)^[3]认为细沟水流与坡面流不同,细沟水流集中,其水深可为坡面流的50倍,流速可为坡面流的10倍。这无疑加强了对坡面

土壤的侵蚀产沙。梅叶等(Meyer, et. al.)^[4]通过实验测定:坡地产沙与细沟的出现密切有关,在坡宽为3.6 m的坡地上,细沟数为3~5条的产沙量比只有一条的坡地产沙量大40%以上。由此可见,对坡面土壤侵蚀的研究,只考虑其侵蚀产沙量是不够的,应同时研究坡面侵蚀的形态结构。

1.1 坡地侵蚀平面形态资料的选取

根据坡面细沟微地貌结构分析的需要,选取徐为群等^[5]对黄土坡面侵蚀实验的坡地平面形态资料。该实验在中国科学院地理所水流地貌室进行,共分10个组次。每一组的初始地形条件均为前一组的终极地形条件。每组降雨强度恒为 9.38×10^{-2}

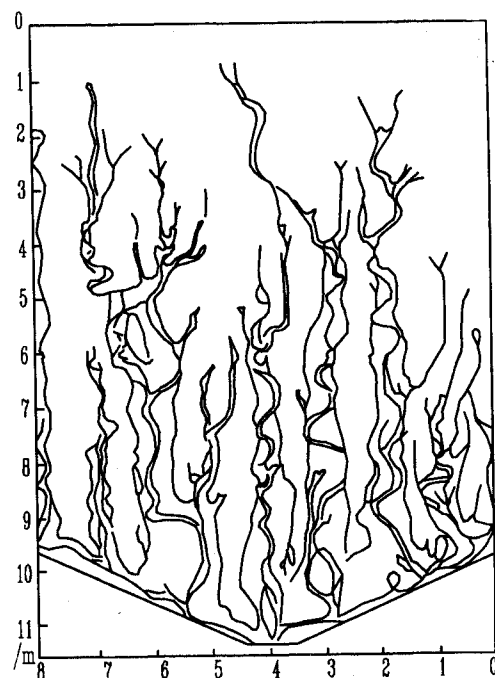


图1a 第8组实验后的流域平面图

* 本文是国家自然科学基金资助项目(编号 49371016)

mm/s,降雨历时 90 min,组间间隔 1~2 d,实验场地宽 8 m,中心线长 11.3 m,两侧长 9.6 m,平均坡降 6.38%。黄土中值粒径为 0.076 mm。由于其第 8~10 组实验的最后阶段地面发育状况出现入渗、产流、产沙过程已趋稳定,而且侵蚀以细沟侵蚀为主,坡面形态出现了趋于平衡的老年期地貌。因此,选取第 8~10 组坡地平面形态为研究对象。其平面形态展布见图 1a、图 1b、图 1c。

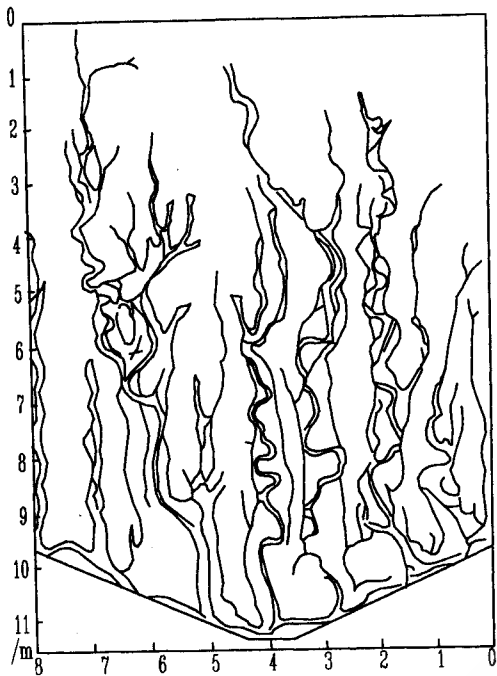


图 1b 第 9 组实验后的流域平面图

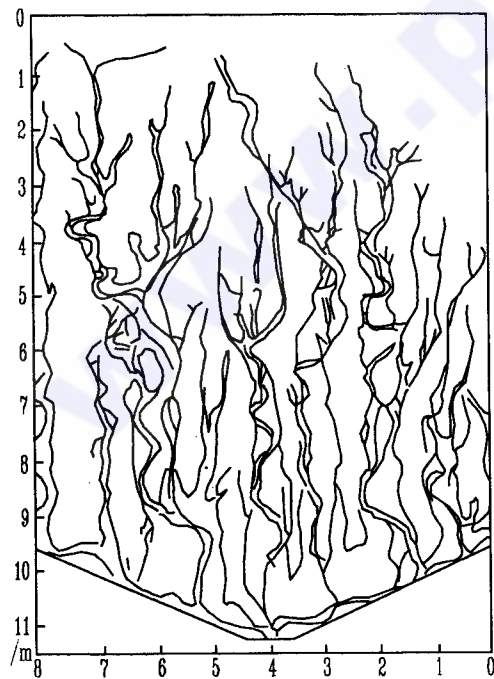


图 1c 第 10 组实验后的流域平面图

1.2 微地貌细沟结构统计分析

坡面细沟的形成受降雨、地形、土壤特性等因素的影响,是一种极其复杂的物理过程,用确定性理论难以准确地描述其时空变化。因此,利用随机理论对细沟进行统计分析,以细沟密度、细沟侵蚀强度指标参数判定坡面细沟化的程度。

以平面粗视化网格把坡面划分成无数细小方格,每一小方格有两种状态:一是包含细沟且占满小方格(假定方格边长 l 满足条件),另一种不包含细沟。设每一小方格代表微地貌细沟单元,用坡面网格函数表示为:

$$\text{Grid}(x, y, t) = \begin{cases} l & (y, y+l) \text{ 有细沟} \\ 0 & (y, y+l) \text{ 无细沟} \end{cases} \quad (1)$$

式中 x 为沿坡长距离, y 为坡面横断面距离,以坡顶某一端为原点,概化为图 2。

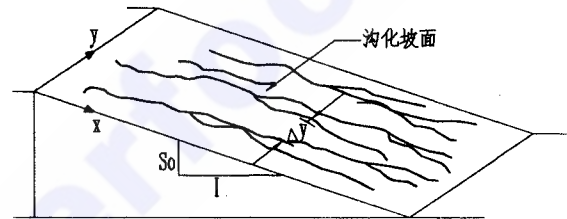


图 2 细沟化坡面概化图

根据实验资料情况,取相当于实验场地 $l = 15$ cm,对图 1a、图 1b、图 1c 的坡地平面形态进行网格化,可得一系列网格函数 $\text{Grid}(x_i, y_i, t_k)$ 时空序列。

细沟在坡地上的发育及发展过程伴随着对坡地的侵蚀,细沟密度反映了细沟发育的复杂程度,从而可作为研究坡地侵蚀的一个定量指标。在坡长为 L ,宽度为 W ,平均坡降为 S_0 的坡地上,如图 3 所示。如果在 $A-A'$ 断面的细沟数为 n ,其各自宽度为 $B_i (i = 1, 2, \dots, n)$,则 $A-A'$ 断面细沟密度 R_d 为

$$R_d = \sum_{i=1}^n B_i / W \quad (2)$$

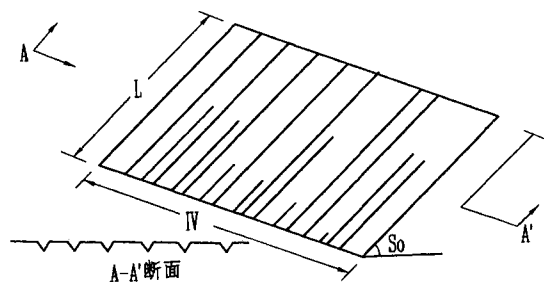


图 3 细沟模式示意图

因此,由细沟结构单元网格函数可以将(2)式细沟密度函数变为

$$R_d(x, y, t) = \frac{1}{y} \int_0^y \text{Grid}(x, y, t) dy \quad (3)$$

利用细沟结构单元的网格函数序列,对坡地平面形态细沟密度指标进行分析,可得其时空变化趋势,如图 4a, 4b, 4c 所示。

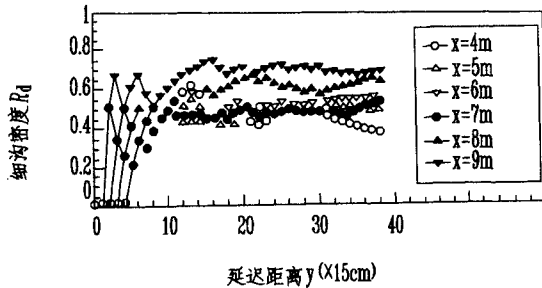


图 4a 细沟化坡面细沟密度变化图

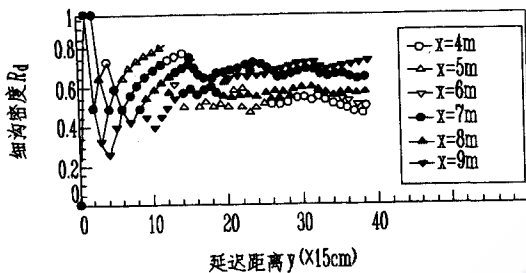


图 4b 细沟化坡面细沟密度变化图

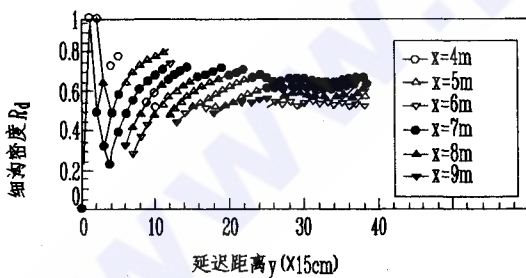


图 4c 细沟化坡面细沟密度变化图

由图可知:细沟平均密度随坡距、历时的增加而增大,随坡地横断面距离的增加而趋于稳定;在图 4c 中,可近似认为 y 大于 3 m 时,细沟平均密度趋于稳定,其值约为 0.56~0.72,平均值可取为 0.64。由此可得该稳定坡面侵蚀的平均统计细沟数为 $n = 8 \times 0.64 / 0.30 = 17$ (条),细沟平均侵蚀强度 $RI = 17/8 = 2$ 条/米。

2 坡地侵蚀沟系的分形研究

自然界存在着许多不规则的形态和现象,如弯曲的海岸线、形态多样的河流和山脊,它们具有尺度不变性和自相似特点。这种不规则但具有尺度不变性和相似性形变被称为分形^[6],分形的特点是由分维数来描述的。

水系是由地表水的侵蚀、搬运和堆积作用形成的地貌景观,也是所在地区内外地质营力作用的产物。水系的形成和发育与气候、地层岩性、地质构造等诸因素有关。水系遍布地表,河流的弯曲和分枝状态,不论从支流还是全体来看,都没有太大的变化,它们具有自相似及尺度不变性,是典型的分形结构。因此,可用分形理论对其展布形态加以研究。

一般对于水系的干流,采用海岸线分维的方法,即 $L_H = L_E \delta^{D-1}$ 可求干流的分维数 D 。式中 L_H 为豪斯道夫长度, L_E 为欧氏长度, δ 为码尺。对于树枝状水系、放射水系等,曼德罗伯特(Mandelbrot)^[7]以公式 $L = C_0 A^{D/2}$ 计算分维数,式中 L 为流域长度, C_0 为系数, A 为流域面积。Mandelbrot 证明,对于许多水系, $C_0 = 1.4$, 水系分维数 $D = 1.2$ 。哈克曾用朗拜恩测定的数据验证过这一关系。这样,水系分维数变为 $D = 2 \ln(L/C_0) / \ln A$, 该公式主要用于干流型水系。另外,菲尔德(J·Feder)^[8]以霍顿定律为基础,导出水系分维公式 $D_s = 2 \ln(R_L/R_b)$ 。式中 R_L 为霍顿长度比, R_b 为霍顿分枝比。

由于坡面沟系尺度较小,发育程度极不规则,一般不属于干流型水系,而且细沟水道级别也难以用斯揣勒(A·N·Strahler)或霍顿(R·E·Horton)划分原则进行分析,因此,上述介绍的水系分维公式难以满足计算要求。为此,利用李后强等^[9]提出的平面分形图的分维计算方法——数盒子法,对坡面沟系分维数进行计算。以方格边长为 r 的方格网覆盖在平面分形图上,数出包含图形的方格数 $N(r)$ 。对不同的 $r_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$, 将得到 m 个不同 $N(r_i)$ 值。在重对数轴上标绘 $N(r_i)$ 与 r_i 数值之间的经验关系,用最小二乘法拟合出一条直线,可用下式表示:

$$\ln N(r) = A - D \ln r \quad (4)$$

式中 A 为系数, D 为所求分维数。

本文统计沟系的粗视化网格尺度时采用的正方形网格边长相当于实地的 15 cm、30 cm、60 cm、120 cm,对图 1a, 1b, 1c 的坡地沟系平面形态时空变化进行分析,所得结果见表。

拟合方程结果表

细沟化坡面	坡长 /m	拟合方程 $\ln N(r) = A - D \ln r$	分维数 D	相关系数 R	备注(分维数时空统计值)
图 1a	7	$\ln N(r) = 10.2329 - 1.53299 \ln r$	1.533	-0.9957	
	8	$\ln N(r) = 10.459 - 1.53199 \ln r$	1.532	-0.9980	
	9	$\ln N(r) = 10.651 - 1.53556 \ln r$	1.534	-0.9994	
图 1b	7	$\ln N(r) = 10.6236 - 1.61484 \ln r$	1.615	-0.9960	$D = 1.589$ $R = -0.9892$
	8	$\ln N(r) = 10.8009 - 1.60358 \ln r$	1.604	-0.9983	
	9	$\ln N(r) = 10.94486 - 1.59783 \ln r$	1.598	-0.9995	
图 1c	7	$\ln N(r) = 10.8978 - 1.6529 \ln r$	1.653	-0.9976	
	8	$\ln N(r) = 11.0234 - 1.63466 \ln r$	1.635	-0.9988	
	9	$\ln N(r) = 10.1339 - 1.62374 \ln r$	1.624	-0.9997	

由上表可知:在某一时刻,沟系的分维数一般随坡长的增加而减小;保持空间位置不变时,沟系分维数随历时增加而增大;伴随坡面形态趋于稳定,沟系的分维数随时空变化不大,其统计平均分维数 $D = 1.589$;水系分维值大小反映了流域水系分布的复杂程度,也间接反映了流域侵蚀程度。与 Mandelbrot 证明的水系分维数一般为 $D = 1.2$ 相比,明显看出坡面沟系发育的复杂程度比整个水系更大,可以初步认为坡地侵蚀是整个流域水系侵蚀的重要组成部分。

3 结 语

(1)坡面上产流、产沙的过程也是坡面形态随时空迅速变化的过程,对于坡面侵蚀的复杂物过程,可用随机理论的方法进行分析,以细沟平均密度指标定量描述坡面侵蚀的程度。

(2)利用分形几何学方法可以判定坡面沟系发育阶段。本文得到的坡面沟系发育趋于稳定时的统计分维值 $D = 1.589$,比 Mandelbrot 求得的干流型水系分维值 $D = 1.2$ 大,由此可认为,坡地侵蚀产沙是整个水系的重要组成部分。

(3)首次把随机理论和分形几何学方法引入到

研究坡地侵蚀平面形态的变化中,取得了初步性的成果,还有待于更深入的讨论。

参 考 文 献

- 1 陈浩等著.流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究.北京:气象出版社,1993年
- 2 陈永宗.黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型.地理科学,1984;4(4),321-327
- 3 Yong, R. A., and J. L. Wiersma. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. Water Resources Research, 1973; (9)
- 4 Meyer, et. al.. Source of Soil eroded by water from upland slopes. Agriculture Research Service publication ARS-S-40, June, 1975.
- 5 徐为群、倪晋仁、徐海鹏等.黄土坡面侵蚀过程实验研究: I. 坡面形态过程.水土保持学报, 1995; 9(4), 19-28
- 6 Mandelbrot; B. B.. Fractals; Form, Chance and Dimensions. W. H. Freeman, San Francisco, 1977
- 7 B. B.. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. W. H. Freeman, New York, 1982; 468
- 8 J. Feder. Fractals. New York and London, 1988
- 9 李后强、汪富泉著.分形理论及其在分子科学中的应用.科学出版社, 1993; 186-187

作者简介

王协康 男 四川联合大学高速水力学国家重点实验室 博士
方 铎 男 四川联合大学水电学院 院长 高速水力学国家重点实验室 教授

(收稿日期:1997-03-13)

Study on the Slope Pattern of the Slope Erosion

Wang Xiekang Fang Duo

(Sichuan Union University State Key Hydraulics Laboratory of High Speed Flows, Chengdu, 610065)

Abstract With the formation of surface flow and sediment slope pattern also changes greatly. The experimental data of the slope erosion are analyzed by stochastic theory and fractal geometry, and some quantitative descriptions for the slope pattern of the slope erosion are obtained according to the rill density and fractal dimension of the rills. This also provides a new method to study the degree of the slope erosion.

Key words slope pattern, stochastic theory, fractal geometry, rill density, fractal dimension.