

坡面径流含沙量随雨强和坡长的动态过程

张锐波¹, 张丽萍², 付兴涛²

(1. 浙江大学城市学院, 信息与电气工程学院, 杭州 310015;

2. 浙江大学土水资源与环境研究所, 浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 坡面径流的含沙特征是研究坡面侵蚀产沙的重要内容。为了研究坡面径流含沙特征及动态过程, 揭示坡面径流含沙量随雨强和坡长的复合关系。采用人工模拟降雨的方式, 通过不同坡长和雨强的组合试验, 基于跨雨强和跨坡长的综合性分析思路, 对特定坡度(20°)下, 5个坡长(1, 2, 3, 4, 5 m)13个降雨强度的试验监测数据进行了分析。结果表明: (1) 坡长不同, 含沙量与雨强的相关性不同, 以2, 3, 4 m坡长含沙量随雨强增加的规律性最明显, 5 m坡长的相关性最差, 1 m坡长的直线相关性较好, 但增长斜率很小, 由此可推得, 研究坡面径流含沙量随雨强变化时, 以2~4 m坡长的试验槽较为适宜; (2) 含沙量随产流历时总体上呈现出波动递减的趋势。含沙量波动特征值在2~4 m坡长范围内波动性小而波动频率大, 在1, 5 m坡长的波动性大但频率小。坡面径流含沙量变化的频率远大于河川径流含沙量的变化频率, 即稳定性较差; (3) 含沙量与主要水文要素和水力学特征参数的拟合都呈现出极显著相关性, 流速、流量和剪切力是影响含沙量波动的重要因素。

关键词: 含沙量; 水文要素; 波动系数; 模拟降雨试验

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0080-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.013

Research on the Dynamic Processes of Sediment Concentrations in Slope Runoff with Rainfall Intensity and Slope Length

ZHANG Ruibo¹, ZHANG Liping², FU Xingtao²

(1. Department of Information and Electrical Engineering, College of City Zhejiang University, Hangzhou 310015;

2. Institute of Soil and Water and Environmental Sciences, College of Environment and Resource Science,

Zhejiang University, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Hangzhou 310058)

Abstract: The sediment characteristics of slope runoff are of great importance to study the slope surface erosion and sediment yield. In order to study the sediment characteristics and the dynamic processes of slope runoff, and to reveal the composite relations between sediment concentrations of slope runoff and the slope length and rainfall intensity, the artificial rainfall simulation were adopted based on the different combinations of slope length and rainfall intensity. The comprehensive analyses were used to analyze the monitoring data of 5 slope lengths (1, 2, 3, 4, 5 m) with 13 rainfall intensities under a designed slope (20°). The results showed that: (1) Under the different slope length, the correlations between sediment concentrations and the rainfall intensities were different. The increases of sediment concentrations were the most obvious with the increasing rainfall intensities in the slope length of 2, 3, 4 m, but the least in 5m. The linear correlation between sediment concentration of slope runoff and the rainfall intensity was better in the 1 m slope length, but its increasing slope was small. Thus, the slope length of 3m was the most suitable for studying the changes of sediment concentrations with different rainfall intensities. (2) The sediment concentrations of slope runoff decreased undulately with the duration of production flow. The fluctuating characteristic value of the sediment concentration was small and the fluctuating frequency was large in the slopes length of 2, 3 and 4 m, while with a large concentration and a small frequency in 1 m and 5 m slopes. The changing fre-

收稿日期: 2017-09-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471221)

第一作者: 张锐波(1959—), 男, 副教授, 主要从事地表过程的力学分析、实验设计及人工模拟降雨设备的技术改进。E-mail: zhangrb@zucc.edu.cn

通信作者: 张丽萍(1959—), 女, 博士, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lpzhang@zju.edu.cn

quency of sediment concentrations of slope runoff was much higher than that in river flow. (3) There were significant correlations between the sediment concentrations of slope and the main hydrological elements and hydraulics characteristic parameters. The flow velocity, discharge and shear force were the important factors affecting the fluctuation of sediment concentrations. Because the starting velocity of sediment varies with different underlying surfaces, it is the key to measure the flow velocity and sediment concentrations timely, accurately and dynamically for the study of slope surface erosion and sediment yield processes.

Keywords: sediment concentration; hydrological elements; fluctuation coefficient; simulated rainfall experiment

坡面径流的含沙特征是研究坡面径流侵蚀强度的重要指标,径流含沙量的沿程变化过程是坡面水力侵蚀受力变化的具体体现,是坡面径流侵蚀—搬运—沉积过程中一个很重要的子过程^[1],是定量分析坡面径流输沙过程的依据之一。坡面径流的含沙量变化明显不同于河流断面的输沙强度,其变化频率和受力的复杂性远大于河流的输沙过程^[2-4]。

关于坡面径流含沙量方面的研究,相关研究领域的学者从不同的侧重点展开了研究。从坡面水力侵蚀的角度,讨论了坡面径流含沙量与水力学参数的关系^[5]。由室内水槽冲刷试验得出的结论认为,随含沙量增加,水流雷诺数减小,水流紊动强度减弱,含沙水流阻力系数均大于清水对应值^[6]。坡面径流平均输沙率与坡面径流平均剪切力之间均存在明显的线性关系^[7]。将坡面土壤侵蚀过程中的受力状态变化分为黏聚态、分散态、挟沙扩散态 3 种动力结构状态,揭示出土壤分散与径流挟沙的动力学机理^[8]。在相同坡度和流量条件下,水流雷诺数随含沙量的增大而减小^[9]。坡面物质特性差异会影响坡面含沙量与水力学参数关系的变化,以及含沙量过程的波动特征^[10-11]。就坡面径流含沙量随环境特征变化过程探讨的成果也非常的显著。坡面含沙量与坡度、雨强和坡面流速相关,而 10 m 坡长所测的含沙量与 5 m 坡长相近。在不同质地黄土、降雨强度和坡度条件下,水流含沙量均呈现先减小后平稳的规律^[12-13]。不同雨强和坡度条件下,片蚀水流含沙量变化过程均表现为先增大后减小,最终趋于相对稳定的趋势^[14]。在紫色土地地区,天然降雨侵蚀过程中流域径流含沙量时间曲线表现为波浪起伏形、幂函数递减形和抛物线复合形 3 种类型^[15]。雨滴击溅会增强水流的紊动作用和水流流态的不稳定性,但这并不意味着雨滴击溅总是增加坡面输沙的强度;当坡度较大时($10^{\circ}\sim 12^{\circ}$),随雨强的增加,雨滴击溅对坡面流单宽输沙率的贡献由增强转为抑制^[16]。坡面径流含沙量的测试精度是准确提供水土流失治理的关键,在坡面径流含沙量监测技术改进和仪器研制方面的成果报道较多^[17-22]。坡面径流含沙量与侵蚀速率及侵蚀强度变化规律方面的研究

是讨论含沙量特征的主要目的。在实地天然降雨条件下的示踪研究结果显示,在次降雨过程及全年的降雨中坡面各段土壤剥蚀率随水流含沙量的增加呈幂函数递增^[23]。含沙量与侵蚀速率的变化规律与坡面跌坎和细沟的形成具有同步关系^[24]。

以往坡面含沙量研究成果显示,一方面,对坡面径流含沙量与水动力学特征、含沙量的坡面过程、以及测试方法方面的研究较多,对坡长汇流及多雨强条件下的综合研究较少。尤其对水文要素和主要水动力学参数的综合作用研究甚少。另一方面,研究成果的出处主要集中在黄土高原地区,对红壤地区坡面径流含沙量特征的研究鲜见报道。鉴于此,本研究以红壤坡地为例,采用人工模拟降雨的方式,通过不同坡长和雨强的组合试验,应用水文学和泥沙运动学及相关拟合线性分析的方法,探讨坡面径流含沙量随雨强和坡长的动态变化过程,讨论坡面径流含沙量的波动特征,揭示坡面径流含沙量与水文要素和主要水力学参数的关系。

1 材料与方法

本研究所实施的人工模拟降雨试验是于 2012 年 9 月至 2014 年 11 月在浙江大学玻璃温室内完成的。试验采用木制的径流槽,其几何规格为:宽 0.5 m,高 0.5 m,长分别为 1,2,3,4,5 m,坡度为 20° ,5 个径流槽平行排列,降雨试验可同时进行。坡面无植被生长,径流槽下端设置有边缘高 5 cm 的集水槽便于收集径流样品。径流槽填充的试验用土是浙江省临安市的典型红壤,在原位进行分层(每层厚度 10 cm,共 5 层,共 50 cm)采集,室内对应层位填充,并保持层位和容重基本相同。试验用土容重 1.51 g/cm^3 ,有机质含量 1.75 g/kg ,pH 为 4.5,黏粒($<0.002\text{ mm}$)、粉粒($0.05\sim 0.002\text{ mm}$)、砂粒($1\sim 0.05\text{ mm}$)含量分别为 33.61%,39.73%,26.66%。人工模拟降雨装置采用的是中国科学院水土保持研究所研制生产的可移动、变雨强、压控双向侧喷式人工模拟降雨装置,雨滴降落时的高度为 6 m。通过调整喷头喷孔直径的大小和水压来调整雨强,同时在小区的边缘设计了

18 个集雨桶来监测降雨的均匀度,要求降雨均匀度均达到 90%左右。试验雨强设置范围为 0.65~2.0 mm/min,每场降雨重复 3 次。每次降雨试验前测定土壤前期含水量,以保证所有降雨试验土壤前期含水量相对一致。产流开始以 2 min 为一个时段采集径流水样,产流时间控制在 30 min,即 15 个时段。坡面径流断面流速采用染色剂法(KMnO₄)测定,设计测速区间为 1 m,在 2,3,4,5 m 坡长的径流槽为对应测速的平均值。将含有泥沙的径流样品带回实验室静置 24 h,通过量测瓶中水的深度和重量得出每隔 2 min 的径流体积和容重,然后倒去上清液,将泥沙烘干称重(105 ℃的条件下烘 12 h)得到每隔 2 min 的泥沙量,计算每个浑水径流样品的含沙量。在此基础上,分别统计和计算 5 个径流槽每场降雨,不同坡长径流槽的平均含沙量(表 1)。

表 1 坡面侵蚀产沙模拟降雨试验场降雨平均含沙量

雨强/ (mm·min ⁻¹)	坡长/m				
	1	2	3	4	5
0.63	0.779	6.207	2.949	1.374	6.586
0.69	0.435	4.238	6.300	2.015	4.247
0.83	0.193	9.443	11.773	7.490	7.644
0.85	0.572	6.921	2.716	2.673	11.523
1.01	0.695	16.394	15.955	10.637	45.911
1.20	0.873	14.745	26.401	22.293	20.571
1.36	1.678	7.115	17.412	4.642	9.329
1.37	0.483	22.104	5.359	10.387	18.240
1.54	2.377	41.023	16.355	19.624	29.839
1.68	0.996	18.784	26.633	11.055	24.879
1.75	3.046	9.439	17.013	9.814	21.876
1.80	0.474	46.017	13.031	20.604	12.840
2.00	3.952	26.405	27.789	22.510	4.703

2 结果与分析

2.1 含沙量随雨强和坡长变化特征

通过对 13 个雨强 5 个坡长整场降雨的 65 个总产沙量和 65 个平均含沙量的数据拟合(图 1),二者呈现出很强的正相关性,其乘幂相关性系数可达 0.959。可见,坡面径流含沙量是分析坡面侵蚀产沙的关键指标^[24-25]。

根据场降雨试验的总径流量和总产沙量,计算每场降雨试验的平均含沙量,在此基础上,将雨强、坡长和平均含沙量 3 个要素关系进行分析。由图 2 可知,在坡长为 1 m 的情况下,含沙量与雨强的相关性以直线为最好,其相关系数为 0.677,但总体来讲,径流中含沙量都比较少。在坡长为 2,3,4 m 的情况下,含沙量随雨强变化的趋势基本上一致,其所呈现的乘幂相关性最好,分别为 0.743,0.705,0.810。而且随着坡长的增加,在任

何雨强情况下,都呈现出增加的趋势,增加的幅度也相差不大。在 5 m 坡长的试验槽中,虽然含沙量随雨强的变化呈现为正相关性,但其相关性很差,最好的为乘幂相关性,其相关系数也只有 0.345。

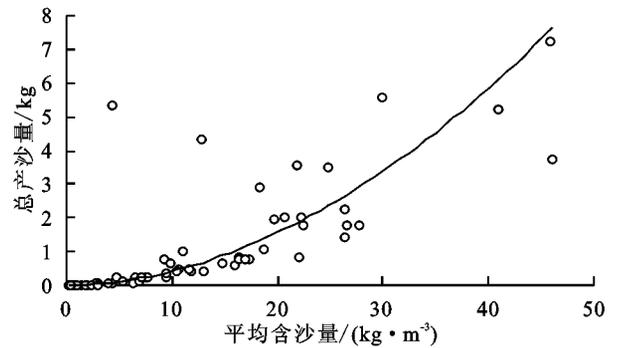


图 1 总产沙量随含沙量的变化趋势

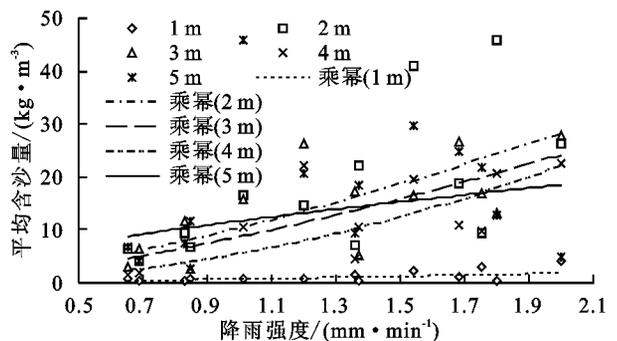


图 2 不同坡长平均含沙量随雨强变化趋势

2.2 含沙量过程波动特征

根据试验设计,在每场降雨试验中,每个坡长都有一个由 15 个含沙量数值构成的曲线,在分析过程中共有 65 条含沙量随产流历时变化的不同波动曲线。现选择雨强为 0.65,1.20,1.68 mm/min,对应坡长为 1,3,5 m 的 9 场降雨试验为例,绘制了含沙量随产流历时的变化曲线。由图 3 可知,在雨强较小时,含沙量随产流历时的变化趋势相对比较稳定,曲线波动较小,并呈现出增长的趋势;当雨强增大时,曲线波动较大,含沙量随产流历时的变化曲线的拟合趋势相关性都很差,并随产流历时呈现出递减的趋势。从产流原理来讲,在小雨强时,主要以蓄满产流为主,坡面径流量是逐渐增加的,因而,其所挟带泥沙运动的过程呈现缓慢的递增趋势。随着雨强的增大,产流方式发生了变化,逐渐向超渗产流的方式转变,其产流波动明显。并随着坡长的增加,又增加了坡面汇流的要素,以及沿程挟沙能力的消长,所以,含沙量随降雨历时的波动越显突出。

为了分析含沙量随产流历时的动态过程,引入了波动系数的计算方法,对 13 场降雨试验 5 个坡长每间隔 2 min 含沙量的波动特征进行了场降雨计算(表 2)。

$$\text{波动系数} = \frac{\text{最大值} - \text{最小值}}{\text{平均值}} \quad (1)$$

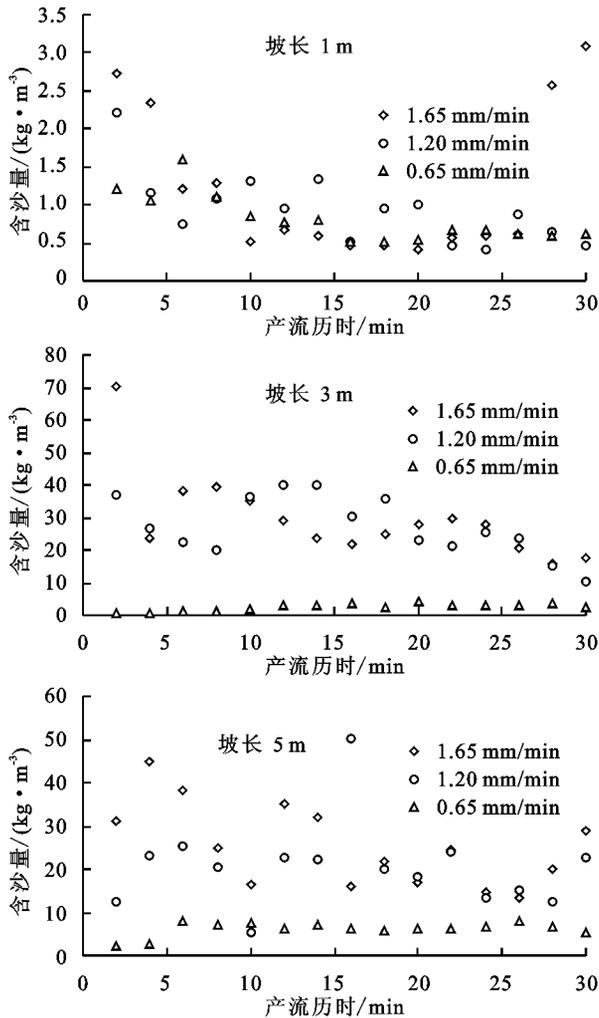


图 3 不同坡长和雨强场降雨含沙量过程曲线

表 2 不同坡长不同雨强下场降雨平均含沙量波动系数

雨强/ (mm·min ⁻¹)	坡长/m				
	1	2	3	4	5
0.65	1.330	0.796	1.530	0.934	0.985
0.69	1.691	2.097	1.492	0.882	1.403
0.83	0.454	1.324	1.244	1.248	1.004
0.85	3.012	1.532	2.201	2.257	1.532
1.01	1.117	1.172	2.428	1.320	2.502
1.20	1.933	1.100	1.082	2.118	0.962
1.36	1.590	1.950	1.480	1.106	0.734
1.37	1.052	1.286	1.013	2.292	1.750
1.54	1.111	0.962	1.486	1.090	1.630
1.68	2.228	2.064	1.847	1.488	1.256
1.75	5.431	0.482	1.836	1.218	1.203
1.80	1.497	2.391	1.246	1.318	0.780
2.00	0.918	2.090	1.797	1.080	3.646

波动系数计算公式(1)的含义表示,波动系数越小,场降雨过程中含沙量的变化过程波动越小,相对比较稳定。由表 2 可知,在 65 个总体数据中,波动系数最大值为 5.431,发生在雨强为 1.75 mm/min 试验的 1 m 的波长,最小值为 0.454,发生在雨强为 0.83 mm/min 试验的 1 m 的波长。波动系数在 0~1 的占总数的 17%,1~2 的占 61.5%,2~3 的占 17%,大于 3 的占 4.5%。就坡长分析,2,3,4 m 坡长的波动系数都很小,都小

于 2.5,也比较稳定;1 m 坡长波动系数大于 3 的值分别呈现在雨强为 0.85,1.75 mm/min 两场的降雨试验中。由此可见,1 m 波长随雨强变化的波动最大;5 m 坡长出现了一个波动系数大于 3 的畸值,除此之外,都小于 3。从雨强来讲,规律性并不明显。

从理论上讲,泥沙进入径流是径流侵蚀力和土壤抗蚀力一对矛盾斗争的结果,是径流侵蚀—搬运—沉积的周期性波动过程。当径流侵蚀力大于土壤抗蚀力时,土壤颗粒随侵蚀力的大小差别选择性进入径流,随径流一起运移。当进入径流的泥沙大于径流的侵蚀力和搬运能力时,径流中的泥沙就逐渐沉积,因此,就出现了径流含沙量随产流历时的波动现象。从试验实测含沙量数据的波动特征可以概括性的推得,当雨强较小时,含沙量的最大值一般出现在产流开始后的 14~20 min,随着坡长的增加,最大值出现的时间较早。当雨强较大时,含沙量的最大值一般出现在产流的初期,即 4~12 min。但也有例外,如果坡面出现沟蚀、或者小型的崩坡现象时,含沙量的最大值在试验过程中可能会随时出现一些奇特的变化。所以,坡面径流的含沙量过程与河川径流的含沙量过程差异很大。

2.3 影响含沙量变化的水文要素与水力学特征参数

从径流、泥沙起动和含沙量三者的理论关系来分析,坡面土壤从剥离、起动进入到径流过程中的主要水文要素包括径流量、径流系数和流速。

在同等坡度的情况下,径流量与坡面的汇流面积有关,面积越大则在径流槽出口径流量就越大^[26-27]。如果对 13 场人工模拟降雨试验所有场次的含沙量和径流量数据进行跨雨强和跨坡长的综合性相关拟合(图 4),二者所呈现的乘幂关系最好,相关系数达到了 0.920。

径流系数不仅能反映径流量的大小,同时也能间接地反映出土壤的入渗特征和产流方式。将 13 场人工模拟降雨试验所有场次降雨试验的场降雨的含沙量和径流系数进行相关性拟合(图 4),二者所呈现的乘幂相关系数为 0.836。

影响坡面泥沙起动的主要因素是径流剪切力和坡面土壤颗粒特性,在坡面土壤机械组成相对一致的背景下,泥沙进入径流的主要动力就是径流的剪切力。研究小组曾经推算得,当总产沙量 < 0.6 g 时,流速对坡面侵蚀产沙的作用要大于径流深^[28]。但在本试验的 65 组总产沙量中只有 2 个数据 < 0.6 g。由此可知,在缓流的范畴内,流速对水动力学参数与总产沙量的关系远远的大于径流深。为此,将 13 场人工模拟降雨试验所有场次降雨试验的场降雨含沙量和径流的平均流速进行相关性拟合(图 4),二者的乘幂相关系数为 0.683。

从上述 3 个坡面径流主要水文要素的相关性分

析来看,在相同的乘幂关系背景下,与含沙量相关系数的排序为总径流量>径流系数>平均流速。

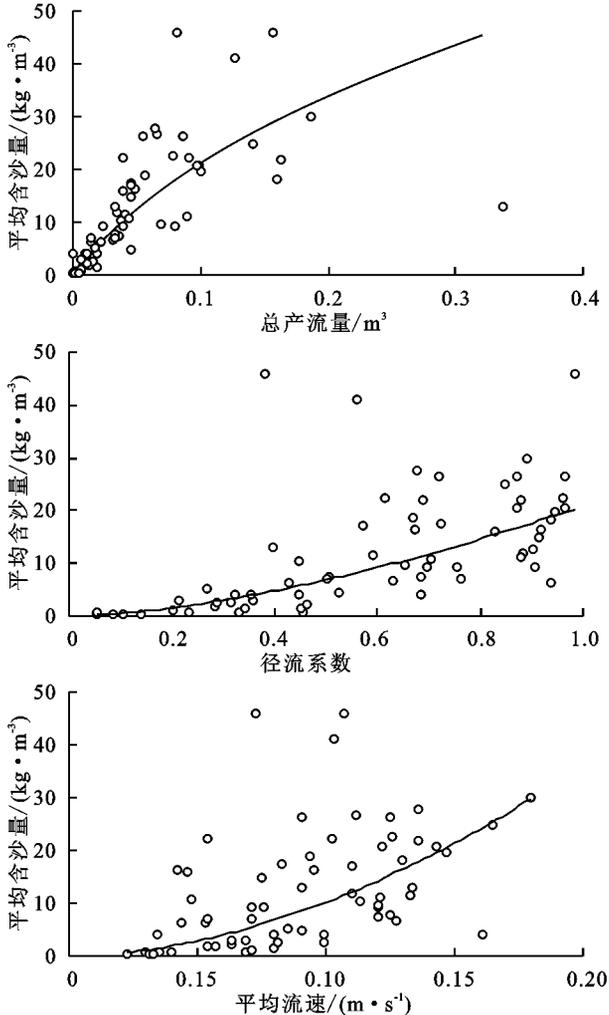


图 4 产流量、径流量、流速与含沙量之间关系

为了说明场降雨不同坡长的平均流速、总径流量和径流系数对平均含沙量的综合影响,用 SPSS 20.0 进行了回归分析,得回归模型:

$$W_s = 68.557Q + 14.385\alpha + 13.784v - 1.080$$

$$R = 0.673 \quad (2)$$

式中: W_s 为平均含沙量 (kg/m^3); v 为平均流速 (m/s); Q 为总产流量 (m^3); α 为径流系数。

在泥沙起动—运移—沉积过程的分析中,泥沙起动流速^[29]和泥沙运动^[30]过程中的力学分析是河川径流输沙研究的经典方法,坡面径流的输沙研究在经典力学分析的基础上,引入了坡面复杂下垫面的因素^[31]。根据试验设计的 13 个雨强和 5 个坡长的 65 组场降雨数据,计算了相应数据的雷诺数(Re)、弗劳德数(Fr)、阻力系数(f)、剪切力(τ)和径流深(h)^[28],将场降雨不同坡长的平均流速(v)加入,通过最小二乘法对 455 个数据的拟合计算,得出了以平均含沙量为因变量的回归模型:

$$W_s = 243.188v - 0.002Re - 62.128Fr + 0.008f + 3.130\tau - 10.507h + 1.901 \quad R = 0.950 \quad (3)$$

上述模型(2)和(3)的方差表明 F 统计量对应的 p 值均为 0.000,远小于 0.01,则说明这两模型整体是显著的,其拟合度相对较好。

3 结论

(1)就坡长对含沙量的关系而言,在不同坡长情况下,含沙量与雨强的相关性不同,并随着雨强的增加增长的斜率也不同,以 2~4 m 坡长范围内的增加规律最明显,5 m 坡长的相关性最差。虽然 1 m 坡长的直线相关性较好,但增长的斜率很小(1.73),而且截距为负数。由此可知,研究坡面径流含沙量随雨强变化时,以 2~3 m 坡长的试验槽较为适宜。

(2)含沙量随产流历时的延续总体上呈现出波动性的递减趋势。在 65(13×5)条含沙量过程曲线中,绝大部分为乘幂相关性递减。并随着雨强的增大,波动的步长在增大。总的波动特征值在 2~4 m 坡长范围内波动性较小,但是波动频率较大,1,5 m 坡长的含沙量波动特征值较大,但波动频率较小。由此可知,坡面径流的含沙量随坡面微地貌的改变、坡面跌坎和细沟的形成,而发生变化的频率远大于河川径流含沙量的变化频率,即稳定性较差。

(3)主要水文要素和水力学特征参数与含沙量的拟合关系都呈现出极显著相关性,从拟合模型中的系数来看,流速、流量和剪切力是影响含沙量波动的重要因素。然而,剪切力与流速的平方成正比,可推得流速是影响含沙量波动的关键性要素。由于不同下垫面泥沙的起动流速不同,所以,在坡面侵蚀产沙过程的研究中,及时、准确和动态地测量水流速度和含沙量,是研究坡面径流侵蚀产沙多要素复杂关系的关键。

参考文献:

- [1] 王玲玲,刘兰玉,姚文艺.水流挟沙力计算公式比较分析[J].水资源与水工程学报,2008,19(4):33-35.
- [2] 王光谦,李铁键,薛海,等.流域泥沙过程机理分析[J].应用基础与工程科学学报,2016,14(4):455-462.
- [3] 李文杰,李丹勋,王兴奎.坡面流挟沙力计算公式及其评价[J].泥沙研究,2012(2):26-33.
- [4] 李文杰,胡江,付旭辉.Low公式计算坡面流挟沙力的改进[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,32(5):1036-1041.
- [5] 罗榕婷,张光辉,曹颖.坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J].地理科学进展,2009,28(4):567-574.
- [6] 赵春红,高建恩,王飞,等.含沙量对坡面流水动力学特性的影响研究[J].农业机械学报,2013,44(9):79-85.
- [7] 李鹏,李占斌,郑良勇,等.坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J].水土保持学报,2005,19(3):66-69.
- [8] 孙全敏,王占礼.坡面土壤分散—径流挟沙动力学模型及应用[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(6):862-876.