红壤区小流域次降雨产流产沙因素分析及模型构建

寇馨月[1,2], 姜学兵[1,2], 黄 俊[1,2],
金平伟[1,2], 林丽萍[1,2], 徐 舟[1,2], 李 乐[1,2]

(1. 珠江水利委员会 珠江流域水土保持监测中心站, 广东 广州 510611; 2. 珠江水利委员会 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘 要: [目的] 探索南方红壤区小流域降雨因子对产流产沙的影响及定量关系,为治理区域水土流失、优化水土资源利用提供参考。[方法] 基于南方红壤区广东省五华县乌陂河和福建省长汀县朱溪河小流域 3 a自然降雨观测资料,采用回归及通径分析等因子分析法研究次降雨对径流泥沙的影响,构建次降雨径流泥沙计算模型。[结果] ① 回归和通径分析结果基本一致:次降雨量、历时、最大 30 min 雨强以及次降雨量与历时交互作用是次降雨径流的关键影响因子;次降雨量、雨强、最大 30 min 雨强、降雨侵蚀力以及次降雨量与雨强交互作用是次降雨产沙模数关键影响因子。② 多元线性回归模型可较为准确和定量地反映 2 个小流域次降雨各因子与径流泥沙动态变化关系。③ 利用 Excel 函数随机选取乌陂河流域 25 组数据和朱溪河流域 23 组数据验证模型,结果显示计算径流泥沙数据与实测数据的相关性非常显著($p<0.05$),其中乌陂河产沙模数模型的相关性最为紧密,相关系数为 0.950。[结论] 多元线性回归模型是乌陂河和朱溪河流域主要降雨因子对径流泥沙定量影响的最佳模型。显著性检验结果表明,该模型达到了极显著水平。

关键词: 降雨因子; 径流泥沙; 通径分析; 定量分析

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2017)06-0034-09 **中图分类号**: S714.7

文献参数: 寇馨月, 姜学兵, 黄俊, 等. 红壤区小流域次降雨产流产沙因素分析及模型构建[J]. 水土保持通报,2017,37(6):34-42. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.006; Kou Xinyue, Jiang Xuebing, Huang Jun, et al. Analysis of factors affecting runoff and sediment yield and its modelling construction in individual rainfall in small watershed of red soil region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(6): 34-42. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.006

Analysis of Factors Affecting Runoff and Sediment Yield and Its Modelling Construction in Individual Rainfall in Small Watershed of Red Soil Region

KOU Xinyue[1,2], JIANG Xuebing[1,2], HUANG Jun[1,2],
JIN Pingwei[1,2], LIN Liping[1,2], XU Zhou[1,2], LI Le[1,2]

(1. *Soil and Water Conservation Monitoring Center of Pearl River Basin, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou, Guangdong* 510611, *China*; 2. *Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou, Guangdong* 510611, *China*)

Abstract: [Objective] Effects of rainfall on runoff and sediment yield and the quantitative relationships were studied in small watershed of red soil region in South China, in order to provide references for controlling soil erosion and optimizing the use of water and soil resources in this region. [Methods] Based on the three years' observations of natural rainfall events of Wubeihe watershed in Wuhua County of Guangdong Province and Zhuxihe watershed in Changting County of Fujian Province in south red soil region, the methods of regression analysis and path analysis and so on were used to study the effects of single rainfall on runoff and sediments. Meantime, the calculation models were built to study the relationship between rainfall and runoff sediment. [Results] ① The results from the methods of regression analysis and path analysis were essentially in agreement: the main rainfall influence factors of runoff were rainfall, duration, 30-minute maximum rainfall intensity(I_{30}) and the interaction of rainfall and duration. The main rainfall influence factors of sediment

收稿日期:2017-05-02 **修回日期**:2017-05-16

资助项目:水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金"红壤区小流域水沙输移规律研究"(2016006); 国家自然科学基金项目"天然林演替为人工林对林地水量平衡及土壤水影响作用机制"(41501019)

第一作者:寇馨月(1990—),女(汉族),辽宁省沈阳市人,硕士,工程师,主要从事水土保持研究。E-mail:yykou@126.com。

yield modulus were rainfall, raininess, 30-minute maximum rainfall intensity I_{30}, rainfall erosivity and the interaction of rainfall and raininess. ② Multivariate linear regression model could accurately reflect the dynamic relationship between rainfall and runoff sediment in the two small watersheds. ③ The model was validated by randomly selected data using Excel, including 25 sets of data in Wubeihe watershed and 23 sets of data in Zhuxihe watershed. The results showed that the correlation between calculated runoff sediment values and the measured data was very significant($p<0.05$), especially for Wubeihe watershed, the correlation coefficient was as high as 0.950. [Conclusion] The multiple linear regression model were the best model for describing the quantitative effects of main rainfall-related factors on runoff and sediment both in Wubeihe watershed and Zhuxihe watershed.

Keywords: precipitation; runoff and sediment; path analysis; quantitative analysis

土壤侵蚀是当今重要环境问题之一[1-3],不仅会破坏土地资源,造成水土流失,同时也会加剧洪涝灾害,引发缺水地区的水危机,严重影响人类赖以生存的环境[4]。南方红壤区近年来水土流失状况虽整体好转,但局部恶化,减少的幅度与治理面积不相称,据统计每年人为新增水土流失达到 2 256 km^2,该区水土流失治理任务仍然十分艰巨[5-6]。降雨是产生土壤侵蚀的主要自然因素[7-9],体现在雨强、雨量、降雨历时等多个降雨因子对径流泥沙的作用影响。但在不同区域,影响土壤侵蚀的降雨因子有所差异。如在缙云山地区,降雨量、最大 10 min 雨强和平均雨强与地表径流有显著关系[10]。而降雨量和降雨历时是影响长江三峡花岗岩地区流量的主要因子[11]。滇中地区雨量和雨强的复合降雨因子对小流域产流产沙量综合影响作用最强[12]。在研究影响流域产流产沙的降雨因子基础上,降雨因子与径流泥沙的关系也是研究的热点。吴发启等人[13]研究发现黄土高原南部缓坡耕地的次降雨量与土壤侵蚀量呈乘幂函数关系;李庆云[14]对籍河流域的研究结果表明,降雨量与径流泥沙存在线性关系;姚治君等人[15]在云南玉龙山东南坡区域的研究结果也表明不同降雨影响因子与流失土量之间也呈线性函数关系。因此,探讨南方红壤区小流域降雨因子对径流产沙的影响及定量关系,既是探索小流域土壤侵蚀过程的需要,也是治理水土流失、评价侵蚀环境效应、优化水土资源利用的实际需要。针对红壤区相关研究成果仍相对不足的现状问题,本文选取了南方红壤区珠江流域的朱溪河小流域和乌陂河小流域为研究对象,采用通径分析、多元回归分析等研究方法,研究次降雨对小流域径流泥沙影响作用,构建小流域次降雨径流泥沙计算模型,以期为小流域水土流失治理提供参考依据。

1　研究区概况

乌陂河小流域(24.1°N,115.6°E)位于广东省五华县,属珠江流域韩江上游,地貌以山地丘陵为主,地形破碎,沟壑密布。气候类型为南亚热带季风性湿润气候,多年降雨量为 1 519 mm,多年平均气温为 20.5 ℃,平均土壤侵蚀模数是 2 660 t/(km^2 · a)。水土流失主要为水力侵蚀,类型有面蚀、沟蚀和崩岗侵蚀。小流域内土地利用主要是以林地为主。卡口控制站在源坑水汇流口水保站附近,控制集雨面积为 4.8 km^2,建有观测房 1 座,布设 WGZ-1 光电数字水位计、分层采样器等观测设施设备等。

朱溪河小流域(25.7°N,116.5°E)位于福建省长汀县,属珠江流域韩江水系一级支流。流域内的地貌以低山丘陵为主,集中了面蚀、沟蚀等不同水土流失类型,具丘陵红壤侵蚀区的典型特征。气候类型为中亚热带季风性湿润气候,多年降雨量为 1 697 mm,多年平均气温为 18.3 ℃,平均土壤侵蚀模数是 1 960 t/(km^2 · a)。卡口站设置在流域内游屋圳的出口断面处,控制集雨面积为 6.26 km^2,采用 WJF-2 水位雨量数据采集仪、分层采样器等观测设备对降雨、水位、流量及含沙量、侵蚀量、输水率、输沙模数等进行监测。乌陂河和朱溪河小流域的具体信息详见表 1。

2　材料与方法

数据来源于 2013—2015 年的朱溪河和乌陂河流域自然降雨观测试验,降雨因子采用遥测雨量器观测,流域产流产沙量通过卡口站的观测设备收集。观测数据均为自然降雨事件,通过初步筛选,本试验共收集到乌陂河流域 125 组数据,朱溪河流域 123 组数据;使用 SPSS,Excel 以及 Matlab 等软件进行数据处理。

采用统计学方法的通径分析以及多元线性回归分析等辨析影响乌陂河和朱溪河流域径流产沙的主要降雨因子。通径分析是通过分解自变量与因变量之间表面直接相关性,来研究自变量对因变量的直接重要性和间接重要性,从而为系统决策提供可靠依据[16-18]。多元线性回归分析是研究多个自变量对因变量的综合影响,可通过多个自变量的最优组合共同来预测或估计因变量[19-21]。为消除各因子由于量纲不同对分析造成的影响,通过数据标准化[22]处理原

始数据。数据标准化的计算公式为：

$$X=(x_{ij}-\bar{x}_i)/s_i \quad (1)$$

式中：X——标准化值；x_{ij}——原始数据；$\bar{x}_i$——第 i 行平均数；s_i——第 i 行标准差。

表 1 乌陂河和朱溪河小流域基本信息

项 目	乌陂河	朱溪河
流域长度/km	3.40	3.80
流域形状系数	1.42	2.10
主沟道纵比降/%	1.90	1.01
≥8°流域面积比例/%	86.90	63.80
主要植被类型	马尾松、岗松、桃金娘、芒萁、蔗鸡草	马尾松、芒箕、胡枝子、宽叶雀稗、百喜草、木荷
植被覆盖率/%	60	79
土壤类型	红壤	红壤

注：各物种拉丁学名分别为：马尾松（*Pinus massoniana*）；岗松（*Baeckea frutescens*）；桃金娘（*Rhodomyr tustomentosa*）；芒箕（*Dicranopteris dichotoma*）；鹧鸪草（*Eriachne pallescens*）；胡枝子（*Lespedeza bicolor*）；宽叶雀稗（*Paspalum delavayi*）；百喜草（*Paspalu mnotatum*）；木荷（*Schima forresti*）。

3 研究结果与分析

本研究在每场次自然降雨过程中收集到了 7 种降雨因子：降雨历时（min，x_1），次降雨量（mm，x_2），次降雨平均雨强（mm/h，x_3），最大 30 min 雨强 I_{30}（mm/h，x_4），降雨侵蚀力〔MJ · mm/(hm^2 · h)，x_5〕，雨量×历时（x_6，表示二者交互作用），雨量×雨强（x_7），后 2 个降雨因子为雨量和历时、雨量和雨强对径流泥沙的共同影响。研究数据由 248 个样本组成，每个样本有 9 个因子（包含径流深和产沙模数因子），进行通径分析和多元线性回归分析。

3.1 基于多元线性回归分析的次降雨因子对径流泥沙的影响分析

表 2 为小流域径流泥沙多元线性回归分析结果。通过 F 检验对两流域多元回归模型进行检验，p 值均小于 0.01，说明该回归模型达到了极显著的水平。可以看出，影响乌陂河径流深的降雨因子主要是 x_2，x_1 和 x_6；其中 x_2 和 x_6 与径流深的呈正相关性，x_1 与径流深的呈负相关性，即雨量和历时的综合作用对径流深的影响是正向的，但历时单一因子对径流深的影响是负向的。影响乌陂河产沙模数的降雨因子主要是 x_5，x_4 和 x_2；其中 x_5 和 x_2 与产沙模数的呈正相关性，x_4 与产沙模数的呈负相关性。而在朱溪河流域，x_6、x_4 和 x_1 是产生径流深的主要降雨因子；其中 x_4 和 x_6 与径流深的呈正相关性，x_1 与径流深的呈负相关性。x_2、x_3 和 x_7 这 3 个降雨因子对朱溪河流域产沙模数有主要影响。由此可见，单一降雨因子历时与乌陂河和朱溪河两个流域的径流深均呈负相关；但在历时与雨量的综合作用下，与径流深呈正相关性。降雨量对乌陂河和朱溪河的产沙模数呈正向影响，即雨量促进 2 个流域的产沙。

表 2 乌陂河和朱溪河小流域径流泥沙多元线性回归分析

流域	自变量	径流深		产沙模数	
		回归系数	标准化值	回归系数	标准化值
乌陂河	x_1	−0.002 96	−0.278 96	−0.000 06	−0.327 98
	x_2	0.253 37	0.802 62	0.001 93	0.377 83
	x_3	−0.127 85	−0.123 66	−0.002 07	−0.123 82
	x_4	−0.059 76	−0.169 55	−0.002 85	−0.500 32
	x_5	0.002 68	0.171 01	0.000 22	0.869 86
	x_6	0.000 03	0.258 70	0.000 00	0.165 61
	x_7	0.003 23	0.144 47	0.000 06	0.189 67
	C	−0.175 03	—	0.037 09	—
	R^2	0.904 00	—	0.823 00	—
朱溪河	x_1	−0.002 46	−0.163 19	−0.010 03	0.102 93
	x_2	0.013 36	0.028 17	0.000 03	0.446 42
	x_3	−0.022 16	−0.018 66	0.003 88	0.283 02
	x_4	0.134 06	0.216 26	0.006 16	−0.239 35
	x_5	−0.002 99	−0.071 30	−0.002 72	0.231 87
	x_6	0.000 12	0.741 33	0.000 18	0.001 26
	x_7	−0.001 07	−0.024 29	0.000 00	−0.262 39
	C	1.791 03	—	0.010 03	—
	R^2	0.420 00	—	0.237 00	—

3.2 基于通径分析的次降雨因子对径流泥沙影响分析

次降雨因子与径流深、产沙模数的多元回归模型，均达到了极显著水平（$p<0.01$），说明回归关系具有统计学意义，可以进行多因子的通径分析。

3.2.1 对径流深影响 通过对 x_1—x_7 的与径流深通径系数正规方程组的求解，计算原因对结果的直接和间接作用，并求降雨因子对径流深的决定系数值（表 3—4）。分析表 3—4 得出以下结论：① 两个小流域的 7 个降雨因子与径流深的相关系数均为正，表明降雨因子与径流深的通径关系呈正相关性；② 对于乌陂河流域，x_2 的决定系数为 0.644 2，居各单因子决定系数之首；并且 x_2 的直接通径系数和对 R^2 总贡献

也是最大值,说明 x_2 是影响乌陂河流域径流深的主要降雨因子;x_1 和 x_6 的决定系数、对 R^2 总贡献和直接作用分别居第 2,3 位。朱溪河流域,决定系数最大的是 x_6,为 0.549 6,同时,对 R^2 总贡献和直接通径系数值居各单因子之首;x_4 和 x_1 的决定系数、对 R^2 总贡献和直接作用分别居第 2,3 位。这与前文小结的分析结果一致。③ 在乌陂河流域,各降雨因子的间接通径系数均为正,即各因子通过其他因子对径流深起到促进作用。在朱溪河流域,x_4 和 x_6 的间接通径系数为负值,即这两个因子通过其他因子对径流深的影响是抑制作用,其他因子则是促进作用。④ x_2 通过 x_1 对乌陂河流域径流深的间接通径系数为 −0.138 2,x_1 通过 x_2 的间接通径系数为 0.397 7,两者总和为正,因此 x_1 和 x_2 共同对乌陂河流域径流深起到促进作用。⑤ 在朱溪河流域,x_1 通过 x_4 对径流深的间接通径系数为 −0.008 7,x_4 通过 x_1 的间接通径系数为 0.006 6,两者总和为负,因此 x_1 和 x_4 共同起到抑制作用。

表 3　乌陂河小流域各降雨因子对径流深影响通径分析

通径	相关系数	x_j 对 y_{i1} 的直接作用	x_j 通过 x_k 对 y_{11} 的间接作用		间接作用总和	对 R^2 的总贡献	决定系数
x_1-y_{11}	0.405 0	−0.279 0	$x_1\to x_2\to y_{11}$	0.397 7	0.684 0	−0.113 0	0.077 8
			$x_1\to x_3\to y_{11}$	0.049 5			
			$x_1\to x_4\to y_{11}$	0.031 4			
			$x_1\to x_5\to y_{11}$	−0.000 8			
			$x_1\to x_6\to y_{11}$	0.232 5			
			$x_1\to x_7\to y_{11}$	−0.026 3			
x_2-y_{11}	0.941 7	0.802 6	$x_2\to x_1\to y_{11}$	−0.138 2	0.139 1	0.755 9	0.644 2
			$x_2\to x_3\to y_{11}$	−0.012 9			
			$x_2\to x_4\to y_{11}$	−0.078 8			
			$x_2\to x_5\to y_{11}$	0.116 0			
			$x_2\to x_6\to y_{11}$	0.177 6			
			$x_2\to x_7\to y_{11}$	0.075 4			
x_3-y_{11}	0.110 6	−0.123 7	$x_3\to x_1\to y_{11}$	0.111 7	0.234 3	−0.013 7	0.015 3
			$x_3\to x_2\to y_{11}$	0.083 6			
			$x_3\to x_4\to y_{11}$	−0.098 1			
			$x_3\to x_5\to y_{11}$	0.070 5			
			$x_3\to x_6\to y_{11}$	−0.050 2			
			$x_3\to x_7\to y_{11}$	0.116 7			
x_4-y_{11}	0.449 4	−0.169 6	$x_4\to x_1\to y_{11}$	0.051 7	0.619 0	−0.076 2	0.028 8
			$x_4\to x_2\to y_{11}$	0.372 9			
			$x_4\to x_3\to y_{11}$	−0.071 5			
			$x_4\to x_5\to y_{11}$	0.150 2			
			$x_4\to x_6\to y_{11}$	0.005 3			
			$x_4\to x_7\to y_{11}$	0.110 4			
x_5-y_{11}	0.678 2	0.171 0	$x_5\to x_1\to y_{11}$	0.001 2	0.507 2	0.116 0	0.029 3
			$x_5\to x_2\to y_{11}$	0.544 2			
			$x_5\to x_3\to y_{11}$	−0.051 0			
			$x_5\to x_4\to y_{11}$	−0.149 0			
			$x_5\to x_6\to y_{11}$	0.048 0			
			$x_5\to x_7\to y_{11}$	0.113 7			
x_6-y_{11}	0.615 4	0.258 7	$x_6\to x_1\to y_{11}$	−0.250 7	0.356 7	0.159 2	0.066 9
			$x_6\to x_2\to y_{11}$	0.551 1			
			$x_6\to x_3\to y_{11}$	0.024 0			
			$x_6\to x_4\to y_{11}$	−0.003 5			
			$x_6\to x_5\to y_{11}$	0.031 7			
			$x_6\to x_7\to y_{11}$	0.004 0			
x_7-y_{11}	0.526 5	0.144 5	$x_7\to x_1\to y_{11}$	0.050 8	0.382 0	0.076 1	0.020 9
			$x_7\to x_2\to y_{11}$	0.418 9			
			$x_7\to x_3\to y_{11}$	−0.099 9			
			$x_7\to x_4\to y_{11}$	−0.129 5			
			$x_7\to x_5\to y_{11}$	0.134 6			
			$x_7\to x_6\to y_{11}$	0.007 1			

表 4 朱溪河小流域各降雨因子对径流深影响通径分析

通径	相关系数	x_j 对 y_{i1} 的直接作用	x_j 通过 x_k 对 y_{11} 的间接作用		间接作用总和	对 R^2 的总贡献	决定系数
x_1-y_{21}	0.476 8	−0.163 2	$x_1\rightarrow x_2\rightarrow y_{21}$	0.019 2	0.640 0	−0.077 8	0.026 6
			$x_1\rightarrow x_3\rightarrow y_{21}$	0.006 3			
			$x_1\rightarrow x_4\rightarrow y_{21}$	−0.008 7			
			$x_1\rightarrow x_5\rightarrow y_{21}$	−0.011 1			
			$x_1\rightarrow x_6\rightarrow y_{21}$	0.631 7			
			$x_1\rightarrow x_7\rightarrow y_{21}$	0.002 6			
x_2-y_{21}	0.509 5	0.028 2	$x_2\rightarrow x_1\rightarrow y_{21}$	−0.111 4	0.481 3	0.014 4	0.000 8
			$x_2\rightarrow x_3\rightarrow y_{21}$	0.000 2			
			$x_2\rightarrow x_4\rightarrow y_{21}$	0.118 3			
			$x_2\rightarrow x_5\rightarrow y_{21}$	−0.050 1			
			$x_2\rightarrow x_6\rightarrow y_{21}$	0.533 0			
			$x_2\rightarrow x_7\rightarrow y_{21}$	−0.008 6			
x_3-y_{21}	0.005 1	−0.018 7	$x_3\rightarrow x_1\rightarrow y_{21}$	0.055 5	0.023 7	−0.000 1	0.000 4
			$x_3\rightarrow x_2\rightarrow y_{21}$	−0.000 3			
			$x_3\rightarrow x_4\rightarrow y_{21}$	0.102 2			
			$x_3\rightarrow x_5\rightarrow y_{21}$	−0.017 1			
			$x_3\rightarrow x_6\rightarrow y_{21}$	−0.096 0			
			$x_3\rightarrow x_7\rightarrow y_{21}$	−0.020 6			
x_4-y_{21}	0.209 2	0.216 3	$x_4\rightarrow x_1\rightarrow y_{21}$	0.006 6	−0.007 0	0.045 2	0.046 8
			$x_4\rightarrow x_2\rightarrow y_{21}$	0.015 4			
			$x_4\rightarrow x_3\rightarrow y_{21}$	−0.008 8			
			$x_4\rightarrow x_5\rightarrow y_{21}$	−0.062 3			
			$x_4\rightarrow x_6\rightarrow y_{21}$	0.058 8			
			$x_4\rightarrow x_7\rightarrow y_{21}$	−0.016 7			
x_5-y_{21}	0.282 8	−0.071 3	$x_5\rightarrow x_1\rightarrow y_{21}$	−0.025 5	0.354 1	−0.020 2	0.005 1
			$x_5\rightarrow x_2\rightarrow y_{21}$	0.019 8			
			$x_5\rightarrow x_3\rightarrow y_{21}$	−0.004 5			
			$x_5\rightarrow x_4\rightarrow y_{21}$	0.189 0			
			$x_5\rightarrow x_6\rightarrow y_{21}$	0.188 6			
			$x_5\rightarrow x_7\rightarrow y_{21}$	−0.013 3			
x_6-y_{21}	0.622 9	0.741 3	$x_6\rightarrow x_1\rightarrow y_{21}$	−0.139 1	−0.118 4	0.461 8	0.550 0
			$x_6\rightarrow x_2\rightarrow y_{21}$	0.020 3			
			$x_6\rightarrow x_3\rightarrow y_{21}$	0.002 4			
			$x_6\rightarrow x_4\rightarrow y_{21}$	0.017 1			
			$x_6\rightarrow x_5\rightarrow y_{21}$	−0.018 1			
			$x_6\rightarrow x_7\rightarrow y_{21}$	−0.001 1			
x_7-y_{21}	0.129 5	−0.024 3	$x_7\rightarrow x_1\rightarrow y_{21}$	0.017 8	0.153 8	−0.003 1	0.000 6
			$x_7\rightarrow x_2\rightarrow y_{21}$	0.009 9			
			$x_7\rightarrow x_3\rightarrow y_{21}$	−0.015 8			
			$x_7\rightarrow x_4\rightarrow y_{21}$	0.148 5			
			$x_7\rightarrow x_5\rightarrow y_{21}$	−0.039 1			
			$x_7\rightarrow x_6\rightarrow y_{21}$	0.032 5			

注：y_{11}代表乌陂河流域的径流深；y_{21}代表朱溪河流域的径流深。下同。

3.2.2 对产沙模数影响 同样求解 x_1-x_7 与产沙模数通径系数正规方程组，计算原因对结果的直接和间接作用及决定系数值（表 5—6）。分析表 5—6 可知：① 乌陂河流域各降雨因子与产沙模数的相关系数均为正，即降雨因子与乌陂河流域的产沙量通径影响呈正相关；朱溪河流域 x_3 因子与产沙模数的相关系数为负，即 x_3 因子与产沙量呈负相关，其余降雨因子的相关系数为正，则是正相关性。② 乌陂河流域产沙模数与 x_5 直接相关性最高，为 0.869 9，其对 R^2 的总贡献和决定系数也居各因子之首。x_4、x_2 的决定系数、对 R^2 总贡献和直接作用为第 2，3 位。该流域降雨因子对产沙模数的决定系数排序为：$x_5>x_4>x_2>x_1>x_7>x_6$。朱溪河流域，x_2 的决定系数最大，对产沙模数的影响也最大，x_3 和 x_7 的决定系数、对 R^2 总贡献和直接作用分别为第 2，3。影响产沙模数的主要降雨因子与上文的分析结果一致。③ 乌陂河流域 x_5 因子的间接通径系数为负，即 x_5 因子通过其他因子对产沙量具有抑制作用，其余降雨因子的间接通径

系数为正,即具有促进作用。在朱溪河流域,x_3 的间接通径系数为负值,即该因子通过其他因子对产沙模数的影响是抑制作用,其他因子则是促进作用。④ x_5 通过 x_1 对乌陂河流域产沙模数的间接通径系数为 0.001 5,x_1 通过 x_5 的间接通径系数为 −0.003 8,两者总和为负,因此 x_1 和 x_5 共同对乌陂河流域产沙模数起到抑制作用。x_3 和 x_5,x_4 和 x_5 的两个间接通径系数综合为正,即两组因子对产沙模数共同起到促进作用。⑤ 在朱溪河流域,x_2 通过 x_4 对产沙模数的间接通径系数为 −0.130 9,x_4 通过 x_2 的间接通径系数为 0.244 2,两者总和为正,因此 x_1 和 x_4 共同对产沙模数起到促进作用。

表 5　乌陂河各降雨因子对产沙模数影响通径分析结果

通径	相关系数	x_j 对 y_{i1} 的直接作用	x_j 通过 x_k 对 y_{11} 的间接作用		间接作用总和	对 R^2 的总贡献	决定系数
x_1-y_{12}	0.111 9	−0.328 0	$x_1\rightarrow x_2\rightarrow y_{12}$	0.187 2	0.439 9	−0.036 7	0.107 6
			$x_1\rightarrow x_3\rightarrow y_{12}$	0.049 6			
			$x_1\rightarrow x_4\rightarrow y_{12}$	0.092 7			
			$x_1\rightarrow x_5\rightarrow y_{12}$	−0.003 8			
			$x_1\rightarrow x_6\rightarrow y_{12}$	0.148 8			
			$x_1\rightarrow x_7\rightarrow y_{12}$	−0.034 6			
x_2-y_{12}	0.772 5	0.377 8	$x_2\rightarrow x_1\rightarrow y_{12}$	−0.162 5	0.394 6	0.291 9	0.142 8
			$x_2\rightarrow x_3\rightarrow y_{12}$	−0.012 9			
			$x_2\rightarrow x_4\rightarrow y_{12}$	−0.232 5			
			$x_2\rightarrow x_5\rightarrow y_{12}$	0.589 8			
			$x_2\rightarrow x_6\rightarrow y_{12}$	0.113 7			
			$x_2\rightarrow x_7\rightarrow y_{12}$	0.099 0			
x_3-y_{12}	0.237 2	−0.123 8	$x_3\rightarrow x_1\rightarrow y_{12}$	0.131 3	0.361 1	−0.029 4	0.015 3
			$x_3\rightarrow x_2\rightarrow y_{12}$	0.039 4			
			$x_3\rightarrow x_4\rightarrow y_{12}$	−0.289 3			
			$x_3\rightarrow x_5\rightarrow y_{12}$	0.358 6			
			$x_3\rightarrow x_6\rightarrow y_{12}$	−0.032 1			
			$x_3\rightarrow x_7\rightarrow y_{12}$	0.153 3			
x_4-y_{12}	0.576 9	−0.500 3	$x_4\rightarrow x_1\rightarrow y_{12}$	0.060 7	1.077 2	−0.288 6	0.250 3
			$x_4\rightarrow x_2\rightarrow y_{12}$	0.175 5			
			$x_4\rightarrow x_3\rightarrow y_{12}$	−0.071 6			
			$x_4\rightarrow x_5\rightarrow y_{12}$	0.764 2			
			$x_4\rightarrow x_6\rightarrow y_{12}$	0.003 4			
			$x_4\rightarrow x_7\rightarrow y_{12}$	0.144 9			
x_5-y_{12}	0.816 9	0.869 9	$x_5\rightarrow x_1\rightarrow y_{12}$	0.001 5	−0.052 9	0.710 6	0.0756 7
			$x_5\rightarrow x_2\rightarrow y_{12}$	0.256 2			
			$x_5\rightarrow x_3\rightarrow y_{12}$	−0.051 0			
			$x_5\rightarrow x_4\rightarrow y_{12}$	−0.439 6			
			$x_5\rightarrow x_6\rightarrow y_{12}$	0.030 7			
			$x_5\rightarrow x_7\rightarrow y_{12}$	0.149 3			
x_6-y_{12}	0.310 6	0.165 6	$x_6\rightarrow x_1\rightarrow y_{12}$	−0.294 7	0.145 0	0.051 4	0.027 4
			$x_6\rightarrow x_2\rightarrow y_{12}$	0.259 4			
			$x_6\rightarrow x_3\rightarrow y_{12}$	0.024 0			
			$x_6\rightarrow x_4\rightarrow y_{12}$	−0.010 3			
			$x_6\rightarrow x_5\rightarrow y_{12}$	0.161 3			
			$x_6\rightarrow x_7\rightarrow y_{12}$	0.005 2			
x_7-y_{12}	0.653 7	0.189 7	$x_7\rightarrow x_1\rightarrow y_{12}$	0.059 8	0.464 1	0.124 0	0.036 0
			$x_7\rightarrow x_2\rightarrow y_{12}$	0.197 2			
			$x_7\rightarrow x_3\rightarrow y_{12}$	−0.100 1			
			$x_7\rightarrow x_4\rightarrow y_{12}$	−0.382 2			
			$x_7\rightarrow x_5\rightarrow y_{12}$	0.684 8			
			$x_7\rightarrow x_6\rightarrow y_{12}$	0.004 6			

表 6 朱溪河各降雨因子对产沙模数影响通径分析结果

通径	相关系数	x_j 对 y_{i1} 的直接作用	x_j 通过 x_k 对 y_{11} 的间接作用		间接作用总和	对 R^2 的总贡献	决定系数
x_1-y_{22}	0.387 1	0.102 9	$x_1\rightarrow x_2\rightarrow y_{22}$	0.304 8	0.284 2	0.039 8	0.010 6
			$x_1\rightarrow x_3\rightarrow y_{22}$	−0.096 2			
			$x_1\rightarrow x_4\rightarrow y_{22}$	0.009 7			
			$x_1\rightarrow x_5\rightarrow y_{22}$	0.036 2			
			$x_1\rightarrow x_6\rightarrow y_{22}$	0.001 1			
			$x_1\rightarrow x_7\rightarrow y_{22}$	0.028 6			
x_2-y_{22}	0.387 1	0.102 9	$x_2\rightarrow x_1\rightarrow y_{22}$	0.070 3	0.008 3	0.203 0	0.199 3
			$x_2\rightarrow x_3\rightarrow y_{22}$	−0.002 7			
			$x_2\rightarrow x_4\rightarrow y_{22}$	−0.130 9			
			$x_2\rightarrow x_5\rightarrow y_{22}$	0.163 0			
			$x_2\rightarrow x_6\rightarrow y_{22}$	0.000 9			
			$x_2\rightarrow x_7\rightarrow y_{22}$	−0.092 4			
x_3-y_{22}	−0.036 4	0.283 0	$x_3\rightarrow x_1\rightarrow y_{22}$	−0.035 0	−0.319 4	−0.010 3	0.080 1
			$x_3\rightarrow x_2\rightarrow y_{22}$	−0.004 2			
			$x_3\rightarrow x_4\rightarrow y_{22}$	−0.113 1			
			$x_3\rightarrow x_5\rightarrow y_{22}$	0.055 6			
			$x_3\rightarrow x_6\rightarrow y_{22}$	−0.000 2			
			$x_3\rightarrow x_7\rightarrow y_{22}$	−0.222 5			
x_4-y_{22}	0.156 9	−0.239 4	$x_4\rightarrow x_1\rightarrow y_{22}$	−0.004 2	0.396 3	−0.037 6	0.057 3
			$x_4\rightarrow x_2\rightarrow y_{22}$	0.244 2			
			$x_4\rightarrow x_3\rightarrow y_{22}$	0.133 8			
			$x_4\rightarrow x_5\rightarrow y_{22}$	0.202 6			
			$x_4\rightarrow x_6\rightarrow y_{22}$	0.000 1			
			$x_4\rightarrow x_7\rightarrow y_{22}$	−0.180 2			
x_5-y_{22}	0.276 9	0.231 9	$x_5\rightarrow x_1\rightarrow y_{22}$	0.016 1	0.045 0	0.064 2	0.053 8
			$x_5\rightarrow x_2\rightarrow y_{22}$	0.313 9			
			$x_5\rightarrow x_3\rightarrow y_{22}$	0.067 8			
			$x_5\rightarrow x_4\rightarrow y_{22}$	−0.209 2			
			$x_5\rightarrow x_6\rightarrow y_{22}$	0.000 3			
			$x_5\rightarrow x_7\rightarrow y_{22}$	−0.144 0			
x_6-y_{22}	0.401 8	0.001 3	$x_6\rightarrow x_1\rightarrow y_{22}$	0.087 7	0.400 5	0.000 5	0.000 0
			$x_6\rightarrow x_2\rightarrow y_{22}$	0.321 0			
			$x_6\rightarrow x_3\rightarrow y_{22}$	−0.036 6			
			$x_6\rightarrow x_4\rightarrow y_{22}$	−0.019 0			
			$x_6\rightarrow x_5\rightarrow y_{22}$	0.059 0			
			$x_6\rightarrow x_7\rightarrow y_{22}$	−0.011 5			
x_7-y_{22}	0.086 5	−0.262 4	$x_7\rightarrow x_1\rightarrow y_{22}$	−0.011 2	0.348 9	−0.022 7	0.068 8
			$x_7\rightarrow x_2\rightarrow y_{22}$	0.157 2			
			$x_7\rightarrow x_3\rightarrow y_{22}$	0.240 0			
			$x_7\rightarrow x_4\rightarrow y_{22}$	−0.164 4			
			$x_7\rightarrow x_5\rightarrow y_{22}$	0.127 2			
			$x_7\rightarrow x_6\rightarrow y_{22}$	0.000 1			

注：y_{12} 代表乌陂河流域的产沙模数；y_{22} 代表朱溪河流域的产沙模数。

3.3 小流域次降雨径流泥沙模型构建

由以上的分析结果可知，影响乌陂河和朱溪河径流深的降雨因子主要是 x_1，x_2，x_4 和 x_6；影响产沙模数的降雨因子主要是 x_2，x_3，x_4，x_5 和 x_7。为探讨以上因子对各流域的径流泥沙定量影响，从两个流域数据中随机选取 100 组建立回归模型，并用剩下的数据

带入回归模型中,验证回归模型。随机选取数据方法采用 Excel 的 OFFSET 和 RANDBETWEEN 函数,分别从 3 个年度随机选择数据。通过多次拟合,多元线性回归模型是反映乌陂河和朱溪河流域降雨因子与径流泥沙定量关系的最佳模型,模型呈极显著($p<0.05$)。

乌陂河流域次降雨径流泥沙模型为:

$$y_{11}=-2.977\ 10-0.001\ 27x_1+0.319\ 05x_2-0.010\ 54x_4+0.000\ 01x_6$$

$$R^2=0.968,\quad \text{sig.}=0.000$$

$$y_{12}=0.002\ 87+0.001\ 73x_2-0.000\ 29x_3-0.002\ 94x_4+0.000\ 24x_5+0.000\ 05x_7$$

$$R^2=0.864,\quad \text{sig.}=0.000$$

朱溪河流域次降雨径流泥沙模型为:

$$y_{21}=1.912\ 06-0.001\ 91x_1+0.001\ 10x_2-0.096\ 10x_4+0.000\ 12x_6$$

$$R^2=0.424,\quad \text{sig.}=0.000$$

$$y_{22}=0.006\ 65+0.003\ 55x_2+0.004\ 10x_3-0.002\ 73x_4+0.000\ 25x_5-0.000\ 17x_7$$

$$R^2=0.247,\quad \text{sig.}=0.000$$

式中:y_{11},y_{21}——径流深(mm);y_{12},y_{22}——产沙模数(t/hm^2)。

将乌陂河流域随机选取的 25 组数据和朱溪河随机选取的 23 组数据带入模型中,基于 SPSS 的相关分析判断通过模型计算出的径流泥沙量与实测的径流泥沙量的相关性(图 1)。研究结果显示 4 个模型的计算径流泥沙数据与实测数据的相关性非常显著($p<0.05$),说明此相关性具有统计学意义。相关系数均为正值,即计算数据与实测数据具有正相关性,符合实际意义,其中乌陂河产沙模数模型的相关性最为紧密,相关系数最大,为 0.950。通过实测数据的验证,表明多元线性回归模型能够较好反映乌陂河和朱溪河流域的降雨因子对径流泥沙的定量影响,可以为两流域的径流泥沙治理提供依据。

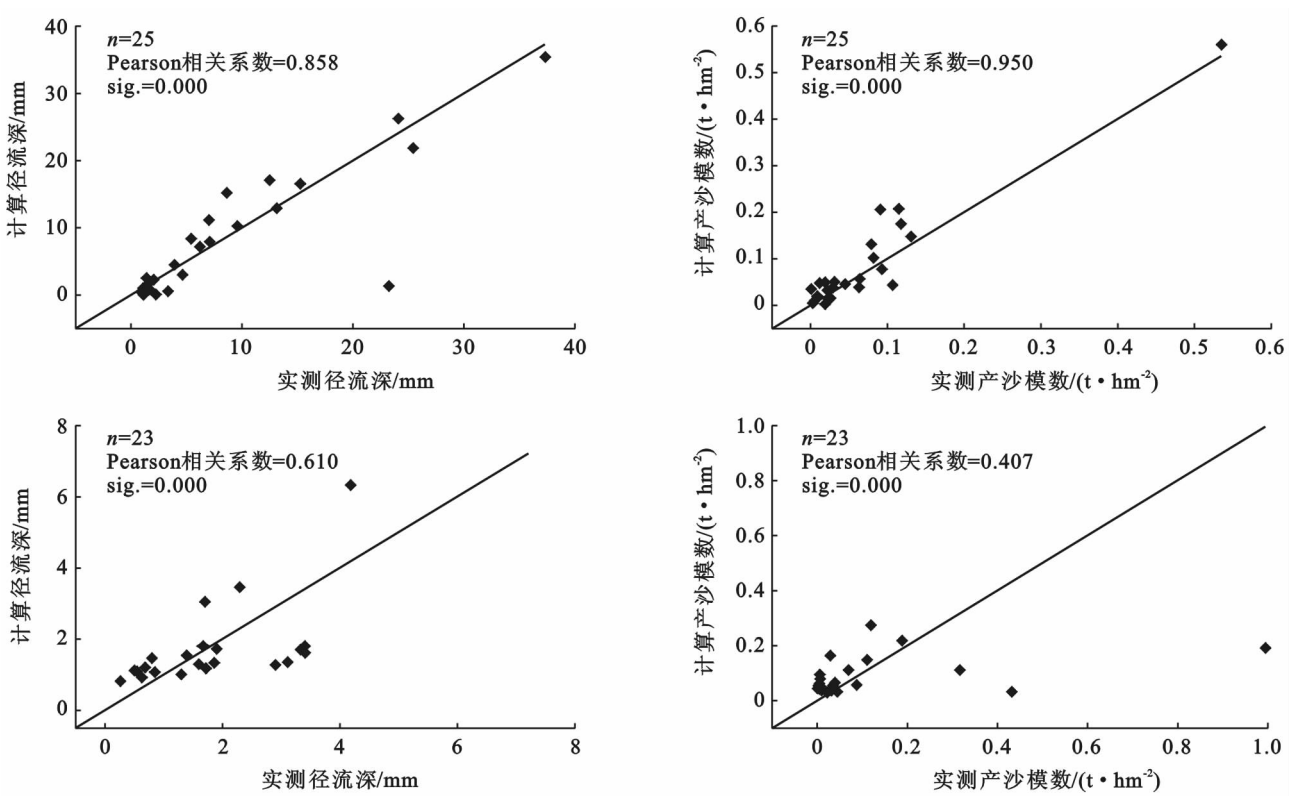


图 1　计算径流泥沙与实测径流泥沙的相关性

4　结 论

(1) 通过回归分析和通径分析可知,次降雨量、降雨历时、雨量和历时的综合因子等 3 个因子对乌陂河流域径流深产生主要影响;降雨侵蚀力、最大 30 min 雨强 I_{30}、次降雨量等 3 个因子对该流域的产沙模数产生主要影响。次降雨量同时是乌陂河小流域产流产沙的主要降雨因子。降雨因子对径流影响方面,次降雨量对径流深具有直接促进作用,降雨历时对径流深起到直接抑制作用,但两者的综合影响对径流深起到直接促进作用。而这 3 个降雨因子通过其他因子对径流的影响均具有间接促进的作用。降雨因子对泥沙影响方面,最大 30 min 雨强 I_{30} 对产沙的直接作用为抑制,降雨侵蚀力和次降雨量对产沙的直

接作用为促进。主要降雨因子对产沙的间接作用与直接作用影响有所不同,降雨侵蚀力通过其他因子对产沙具有抑制作用,最大30 min雨强I_{30}、次降雨量通过其他因子对产沙具有促进作用。

(2) 影响朱溪河流域径流深的主要降雨因子排序为:雨量×历时>最大30 min雨强I_{30}>降雨历时,影响产沙模数的主要降雨因子排序为:次降雨量>次降雨平均雨强>雨量×雨强。雨量和历时的综合因子、最大30 min雨强I_{30}、降雨历时等对朱溪河流域径流深的直接影响均为促进作用;雨量和历时的综合因子通过其他因子对径流深的间接影响具有促进作用;而最大30 min雨强I_{30}和降雨历时通过其他因子对径流深的间接影响则是抑制作用。次降雨量以及雨量和雨强的综合作用对朱溪河流域产沙模数直接和间接影响均具有促进作用,但单一雨强因子对产沙模数则是抑制作用。

(3) 经过多次拟合试验,多元线性回归模型是乌陂河和朱溪河流域主要降雨因子对径流泥沙定量影响的最佳模型,模型呈极显著。其中乌陂河流域次降雨径流泥沙模型拟合效果较好,相关系数均在0.85以上。

[参 考 文 献]

[1] Habip E, Günay C, Fatih S, et al. Using high resolution images and elevation data in classifying erosion risks of bare soil areas in the Hatila Valley Natural Protected Area, Turkey[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24(5):699-704.

[2] Veihe A, Hasholt B, Schiotz I G. Soil erosion in Denmark: processes and politics[J]. Environmental Science & Policy, 2003,6(1):37-50.

[3] Symeonakis E, Drake N. 10-Daily soil erosion modelling over sub-Saharan Africa[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2010, 161(1/4):369-87.

[4] 方怒放.小流域降雨—径流—产沙关系及水土保持措施响应[D].湖北 武汉:华中农业大学,2012.

[5] 梁音,张斌,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):22-27.

[6] 赵其国.我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J].水土保持通报,2006,26(2):1-8.

[7] 张黎明,林金石,于东升,等.南方不同类型土壤侵蚀量与降雨各因子的关系研究[J].水土保持通报,2011,31(2):10-14.

[8] Garcíarodeja I, Gilsotres F. Prediction of parameters describing phosphorus-desorption kinetics in soil sof Galicia (Northwest Spain)[J]. Journal of Environmental Quality,1997,26(5):1363-1369.

[9] 黄俊,赵西宁,吴普特.基于通径分析和灰色关联理论的坡面产流产沙影响因子分析[J].四川大学学报:工程科学版,2012,44(5):64-70.

[10] 李耀明,王玉杰,储小院,等.降雨因子对缙云山地区典型森林植被类型地表径流的影响[J].水土保持研究,2009,16(4):244-249.

[11] 何凡,张洪江,史玉虎,等.长江三峡花岗岩地区降雨因子对优先流的影响[J].农业工程学报,2005,21(3):75-78.

[12] 段青松,字淑慧,吴伯志.滇中地区小流域治理前后降雨因子对产流、产沙影响的灰色关联分析[J].云南农业大学学报,2006,21(3):336-340.

[13] 吴发启,范文波.土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J].水土保持学报,2001,15(3):1-3.

[14] 李庆云.黄土丘陵区流域径流泥沙对气候变化和高强度人类活动响应研究[D].北京:北京林业大学,2011:71-72.

[15] 姚治君,廖俊国.云南玉龙山东南坡降雨因子与土壤流失关系的研究[J].自然资源学报,1991,6(1):45-54.

[16] 任红松,朱家辉,杨斌,等.EXCEL在通径分析中的应用[J].农业网络信息,2006(3):90-92.

[17] 贺江舟,龚明福,范君华,等.逐步回归及通径分析在主成分分析中的应用[J].新疆农业科学,2010,47(3):431-437.

[18] Xing B, Liu Z, Liu G, etal. Determination of runoff components using path analysis and isotopic measurements in aglacier-covered alpinecatchment(upper Hailuogou Valley) in Southwest China[J]. Hydrological Processes, 2015,29(14):3065-3073.

[19] 田兵.多元线性回归分析及其实际应用[J].阴山学刊:自然科学,2011,25(1):16-19.

[20] Maniquiz M C, Lee S, Kim L H. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010,22(6):946-952.

[21] Eigenberg R A, Woodbury B L, Nienaber J A, et al. Soil conductivity and multiple linear regression for precision monitoring of beef feedlot manure and runoff.[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2010,15(3):175-183.

[22] 郭亚军,易平涛.线性无量纲化方法的性质分析[J].统计研究,2008,25(2):93-100.