

蔡家川流域降雨—径流关系及水量平衡分析

郑芳¹, 张建军^{1,2}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西省吉县落叶阔叶林生态系统国家野外站, 山西 吉县 042200)

摘要: 以晋西黄土区蔡家川流域为研究对象, 利用该流域 2004—2009 年的降雨径流实测数据, 采用多重比较和回归分析等统计方法, 对降雨—径流关系及水量平衡进行了研究。结果表明, 流域年耗水量占年降雨量的比例高达 90% 以上, 是水循环过程中的重要支出项; 流域年径流系数只有 1.60%~2.66%; 场降雨条件下径流量和洪峰流量随雨量 P 和最大 60 min 雨强 I_{60} 的量级具有明显的跳跃式变化, 当 $P \geq 30$ mm 时, 径流量、洪峰流量分别是 0~10 mm 雨量级的 8.31、6.52 倍, 当 $I_{60} \geq 20$ mm/h 时, 径流量、洪峰流量分别是 0~10 mm/h 雨强级的 3.35、16.87 倍; 对不同雨型下径流量、洪峰流量与降雨指标进行多元回归分析后得出, 短历时高雨强的 A 型雨下雨强对洪峰流量的贡献率(47.12%) 大于历时较长且雨强较大的 B 型雨(44.62%) 和长历时低雨强的 C 型雨(32.51%), C 型雨下雨量对径流量的贡献率(28.5%) 大于 A 型雨(26.69%) 和 B 型雨(3.15%)。

关键词: 径流; 降雨; 水量平衡; 流域; 黄土区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0071-06

中图分类号: S715

Analyses of Rainfall—Runoff Relationship and Water Balance in Caijiachuan Watershed

ZHENG Fang¹, ZHANG Jian-jun^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. China Ecosystem Observation and Research Station, Jixian, Shanxi 042200, China)

Abstract: By taking Caijiachuan watershed on the Loess Plateau of Western Shanxi Province, as the study object, the relationship between rainfall and runoff and the water balance in the experimental watershed were studied using statistical methods such as multiple comparison and regression analysis for the data of precipitation and runoff measured in the watershed from 2004 to 2009. Results showed that the percentage of yearly water consumption was 90% more than yearly rainfall. Water consumption appeared to be the main water output in the water cycle of the experimental watershed. The yearly runoff coefficient ranged only from 1.6% to 2.66%. Runoff and peak discharge for a single rainfall event changed evidently with changes in the magnitude order of rainfall amount(P) and the maximum 60-min rainfall intensity(I_{60}) in a jump mode. Specifically, runoff volume and peak discharge for $P \geq 30$ mm rainfall were about 8.31 and 6.52 times of those for the 0~10 mm order of rainfall amount, respectively. Runoff volume and peak discharge for $I_{60} \geq 20$ mm/h rainfall intensity were about 3.35 and 16.87 times of those for the 0~10 mm/h order of rainfall intensity, respectively. Regression analysis of runoff, peak discharge, and rainfall indexes under different types of rainfall showed that the contribution of rainfall intensity to peak discharge was highest(47.12%) under A-type rainfall(storm events with short duration and high intensity) as compared to that under B-type rainfall(storm events with long duration and high intensity, 44.62%) and C-type rainfall(storm events with long duration and low intensity, 32.51%), while the contribution of rainfall amount to runoff was highest(28.5%) under C-type rainfall as compared to that under A-type rainfall(26.69%) and B-type rainfall(3.15%).

Keywords: runoff; rainfall; water balance; watershed; Loess Plateau

收稿日期: 2010-01-13

修回日期: 2011-04-30

资助项目: 林业公益性行业科研专项“西北黄土高原地区典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005); 十二五课题“晋陕黄土丘陵沟壑区生态经济型水土保持林研究与示范”(2011BAD38B0603)

作者简介: 郑芳(1983—), 女(汉族), 江西省上饶市人, 硕士研究生, 主要从事数字水文研究。E-mail: fang_515119@163.com。

通信作者: 张建军(1964—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与植被恢复、水文学等研究。E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn。

黄土区沟壑纵横,表层土体疏松易蚀,尤其在高强度集中降水形式下,水土流失十分严重。降水条件是影响流域径流过程、引发水土流失的主要因素^[1]。因此,研究黄土区的降雨—径流关系对黄土区水土流失防治具有重要指导意义。关于流域降雨—径流关系的研究已有较多成果^[2-9],Cattan 等^[10]认为在分析径流形成过程时,植被林冠层引起的降雨重分布是必须考虑的一个因素。屈丽琴等^[11]利用室内小流域模型,采用不变雨强和变雨强模拟降雨试验研究了雨强对径流过程的影响,结果表明,在不变雨强的情况下,流量过程线呈现起流、稳定和退水 3 个明显的阶段,而在变雨强的条件下,流量过程线没有稳定的阶段。李广等^[12]分析了不同土地利用方式的地表产流产沙后指出,雨强对径流量的产生有极显著的正效应。张升堂等^[13]研究了不同量级的降雨对不同治理程度流域径流的影响后,指出水土保持综合治理可以明显改变中雨、大雨的降雨产流量。据邢军等^[14]通过野外人工模拟降雨试验,对不同雨强条件下各地类初始产流时间进行分析,结果表明雨强与初始产流时间表现为明显的负相关趋势。潘成忠等^[15]通过对黄土区次生山杨林和人工油松林长期观测研究表明,在降雨历时 30 min,雨强 1.0~2.0 mm/min 的情况下,林地坡面仍无径流产生,而在雨强 2.5 mm/min,历时 30 min 条件下,山杨林不产流,油松林地只产生少量径流。张建军等^[16]对晋西黄土区坡面水土保持林降雨、径流进行了分析,认为该地区起始产流的基本降雨条件为最大雨强在 10 mm/h 以上,降雨量在 10 mm 以上。但目前为止,场降雨条件下小流域降雨与径流关系的研究仍不多见。本文对不同雨量、不同雨强、不同雨型条件下降雨与径流关系及流域水量平衡进行分析,以期为该区水土流失的防治、地表径流资源的合理利用提供依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吕梁山南端山西省吉县蔡家川流域,是北京林业大学所属的山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地,地理坐标为东经 110°39′45″—110°47′45″,北纬 36°14′27″—36°18′23″属黄土残塬沟壑区。蔡家川流域属义亭河一级支流(义亭河为昕水河一级支流,黄河二级支流),海拔 900~1 513 m。流域大体上为由西向东走向,长约 14 km,面积 38 km²。流域的形状系数为 6.142 5,河流比降为 0.019 4,河网密度为 1.53 km/km²。流域年均降水量为 575.9 mm,6—9 月份降水占年降水量的 70% 左右,年均气温

10℃,年均水面蒸发量 1 732.9 mm,土壤为褐土,黄土母质。蔡家川流域属于典型的黄土区嵌套流域,流域内嵌套了以农地、人工林、次生林、封山育林等为主的的不同植被覆盖的小流域。森林覆盖率 80%,上游以次生林为主,中游以人工林为主,下游以农地、荒草地为主。流域中上游植被主要为白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)、紫丁香(*Syringa oblata*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、杜梨(*Pyrus betuli folia*)、胡颓子(*Elaeagnus pungens*)等组成的天然次生林,中游为侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等树种组成的人工林,下游为农地和荒草坡。

1.2 研究方法

在蔡家川流域内布设长期自记雨量计测定降雨过程,利用流域出口处修建的复合型量水堰,通过超声波水位计(ISCO4100)测定水位(每 5 min 测定水位 1 次),同时利用浮子式长期自记水位计(日产水研 62 型)记录的水位进行校正。径流量利用水位流量关系曲线计算,基流量采用直线切割法求算。

利用蔡家川流域 2004—2009 年降雨径流实测数据,采用 SPSS 17.0 中的相关分析、多重比较、回归分析等统计方法,研究场降雨条件下不同雨量、不同雨强、不同雨型对径流的影响,并对流域水量平衡进行分析。

1.3 场降雨分类

根据王万忠等^[17]在黄土区的研究,黄土区的降雨可根据降雨量、平均降雨强度、10 min 最大雨量、30 min 最大雨量、60 min 最大雨量、降雨历时等指标,划分为短时局地雷暴雨(A 型)、锋面性降雨夹有雷暴性质的暴雨(B 型)、长历时锋面降雨(C 型)。

本研究利用以上指标对蔡家川流域观测到的 2004—2009 年的 57 场全流域降雨进行聚类分析,聚类结果的统计见图 1。

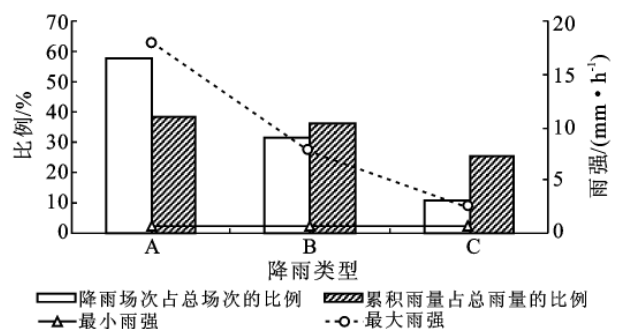


图 1 场降雨分类结果统计

聚类分析的显著性 sig 值为 0.000 1~0.032 0,表明聚类效果较好。在这 57 场降雨中,C 类雨 6 次,累

积降雨量 280.9 mm,分别占总降雨场次、总降雨量的 10.5%,25.5%;B类雨 18 次,累积降雨量 399.8 mm,分别占总降雨场次、总降雨量的 31.6%,36.2%;A 类雨 33 次,累积降雨量 422.4 mm,分别占总降雨场次、总降雨量的 57.9%,38.3%。其聚类结果与王万忠等^[17]的研究结果基本一致。

2 结果与分析

2.1 降雨—径流关系

2.1.1 不同雨量级和雨强级下的流域降雨—径流关系 流域径流是雨量、雨强、雨型、下垫面等综合影响的产物^[18],但不同地区的流域,其径流的主要影响因素不同。段青松等^[19]对王家箐小流域降雨因子分别与场降雨径流量、场降雨侵蚀量进行回归分析后指出,径流侵蚀量与降雨量和最大 30 min 雨强乘积 PI_{30} 的相关性最好。卫伟等^[20]研究了降水特征值对水土流失的影响规律,结果表明在黄土丘陵沟壑区径流量主要受降水量、最大 30 min 雨强及降水量与最大 30 min 雨强之积的影响。本文用蔡家川流域 2004—2009 年 57 场降雨径流资料,对流域径流、洪峰与降雨特征进行相关分析,结果表明洪峰流量与最大 60 min 雨强 I_{60} 的相关关系较好(相关系数 0.55),径流量与降雨量 P 的相关性显著(相关系数 0.714)。相关分析表明,径流量、洪峰流量随 P, I_{60} 的变化趋势较为一致,但是在 P, I_{60} 增大到一定值时,径流量、洪峰

流量往往会出现量的激增,且激增的幅度并不一致。

图 2—3 分别是研究区流域径流量、洪峰流量随 P, I_{60} 分级的变化图。当 $P < 10$ mm 时,平均径流量、洪峰流量均很小,分别为 0.029 mm,0.003 4 $m^3/(s \cdot km^2)$;当 $10 \text{ mm} \leq P < 30$ mm 时,平均径流量、洪峰流量分别是 0~10 mm 雨量级的 3.07,3.32 倍;当 $P \geq 30$ mm 时,平均径流量、洪峰流量分别是 0~10 mm 雨量级的 8.31,6.52 倍。由此可以看到,当雨量增加到 30 mm 以上时,径流量的激增幅度大于洪峰流量。经多重比较(LSD 法),0~10,10~30 mm 雨量级的径流量均与大于 30 mm 雨量级的径流量差异显著,各雨量级的洪峰流量之间差异不显著。

当 $I_{60} < 10$ mm/h 时,平均径流量、洪峰流量分别为 0.075 mm,0.003 4 $m^3/(s \cdot km^2)$;当 $10 \text{ mm/h} \leq I_{60} < 20$ mm/h 时,平均径流量、洪峰流量分别是 0~10 mm/h 雨强级的 2.54,6.96 倍;当 $I_{60} \geq 20$ mm/h 时,平均径流量、洪峰流量分别是 0~10 mm/h 雨强级的 3.35,16.87 倍。可以看到,当雨强增加到 20 mm/h 以上时,洪峰流量的激增幅度远远超过径流量。经多重比较,0~10 mm/h 雨强级的径流量分别与 10~20,20~30 mm/h 雨强级的径流量存在显著差异,但 10~20 mm/h 雨强级的径流量与 20~30 mm/h 雨强级的径流量无显著差异。各雨强级的洪峰流量之间均存在显著差异。

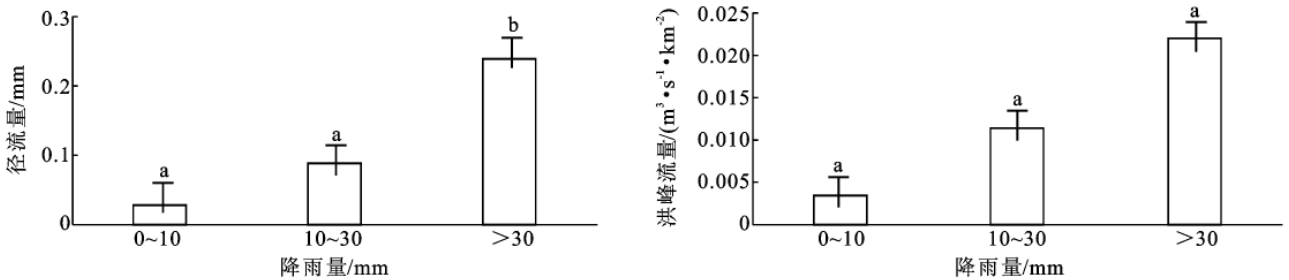


图 2 不同雨量级下的径流、洪峰变化
注:不同字母表示不同雨量级之间差异显著($p=0.05$)。下同。

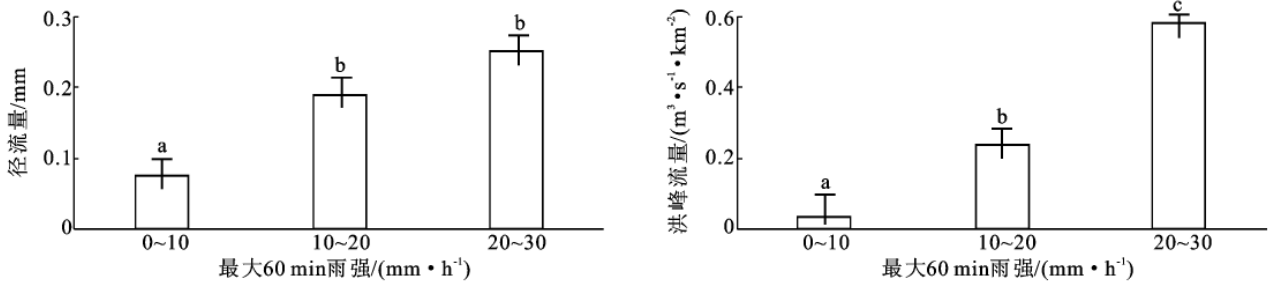


图 3 不同雨强级下的径流、洪峰变化

2.1.2 不同雨型下的流域降雨—径流关系 对不同雨型下蔡家川流域的场降雨径流进行统计分析得到

表 1。从表 1 可以看出,不同雨型下径流差异显著。A 型雨下的平均径流量最小,分别是 B, C 型雨的

80.84%, 38.61%; 而 A 型雨下的平均洪峰流量最大, 分别是 B, C 型雨的 4.37, 1.13 倍。由此看出, A 型雨对洪峰流量的影响明显大于其他雨型。

以降雨量 P , 平均雨强 $I_{均}$, 最大 10 min 雨强 I_{10} , 最大 30 min 雨强 I_{30} , 最大 60 min 雨强 I_{60} 为自变量, 分别建立径流量 Y_r , 洪峰流量 Y_p 的定量计算模型。同时, 由于各指标的数量级相差较大, 为避免大值对小值的掩盖, 对各自变量进行标准化处理, 重新建立回归模型, 以解释各自变量在因变量中的相对贡献率(表 2)。

(1) 径流量 Y_r 。比较 Y_r 模型的各项系数, 可以看出: A 型降雨条件下, I_{10} 与 Y_r 之间为负向变化, 回归系数为 -0.573 ; 在影响 Y_r 正向变化的变量中, I_{60} 的贡献率(29.31%)最大, P 的贡献率(26.69%)次之。B 型降雨条件下, I_{30} 与 Y_r 之间为负向变化, 回归

系数为 -4.072 ; 在影响 Y_r 正向变化的变量中, I_{60} 的贡献率(31.57%)最大, P 的贡献率(3.15%)最小。C 型降雨条件下, 雨量的增多对增大地表径流量的贡献(28.5%)最大, I_{10} 的贡献(27.8%)次之。可见, 与其他雨型相比, C 型雨下雨量对径流量的贡献率最大。

(2) 洪峰流量 Y_p 。比较 Y_p 模型的各项系数, 可以看出: A 型降雨条件下, I_{30} 的增大对增大洪峰流量的贡献(47.12%)最大, 回归系数为 0.670, 远远超过降雨量(16.60%)的回归系数 0.236。B 型降雨条件下, I_{30} 的贡献率(44.62%)仍最大, P 的贡献率(1.73%)最小。C 型降雨条件下, I_{10} 的增大对增大洪峰流量的贡献(32.51%)最大, P 的贡献(24.08%)次之。可见, 与其他雨型相比, A 型雨下雨强对洪峰流量的贡献率最大。

表 1 不同雨型下试验区流域的场降雨径流统计

雨型	径流量/mm				洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)			
	极小值	极大值	均值	标准差	极小值	极大值	均值	标准差
A	0.010 3	0.412 5	0.088 6	0.113 6	0.000 4	0.136 4	0.016 6	0.033 2
B	0.000 2	0.407 6	0.109 6	0.115 3	0.000 2	0.015 5	0.003 8	0.004 7
C	0.042 5	0.400 6	0.229 5	0.142 3	0.001 0	0.051 9	0.014 7	0.018 9

表 2 不同雨型下试验区流域的场降雨径流、洪峰的回归分析

雨型	因变量	定量计算模型	标准化后的回归模型	复相关系数 R
A	Y_r	$-0.032+0.006P+0.005I_{均}-0.004I_{10}+0.001I_{30}+0.008I_{60}$	$0.509P+0.209I_{均}-0.573I_{10}+0.057I_{30}+0.559I_{60}$	0.747**
	Y_p	$-0.005+0.001P-0.001I_{均}-0.001I_{10}+0.002I_{30}+0.0003I_{60}$	$0.236P-0.165I_{均}-0.275I_{10}+0.67I_{30}+0.076I_{60}$	0.600
B	Y_r	$-0.075+0.003P+0.025I_{均}+0.009I_{10}-0.048I_{30}+0.059I_{60}$	$0.278P+0.393I_{均}+1.297I_{10}-4.072I_{30}+2.787I_{60}$	0.811
	Y_p	$-0.002+0.0001P+0.001I_{均}+0.001I_{10}-0.002I_{30}+0.002I_{60}$	$0.142P+0.211I_{均}+2.257I_{10}-3.667I_{30}+1.942I_{60}$	0.889**
C	Y_r	$-0.279+0.0250P-0.479I_{均}+0.063I_{10}-0.025I_{30}-0.078I_{60}$	$3.595P-2.089I_{均}+3.507I_{10}-1.098I_{30}-2.327I_{60}$	1**
	Y_p	$-0.031+0.0020P-0.056I_{均}+0.008I_{10}-0.0004I_{30}-0.010I_{60}$	$2.385P-1.847I_{均}+3.220I_{10}-0.120I_{30}-2.334I_{60}$	1**

注: Y_r 为径流量(mm); Y_p 为洪峰流量($\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$); P 为降雨量(mm); $I_{均}$ 为平均雨强(mm/h); I_{10} 为最大 10 min 雨强(mm/h); I_{30} 为最大 30 min 雨强(mm/h); I_{60} 为最大 60 min 雨强(mm/h); R 为复相关系数; * 显著性水平: $p < 0.05$; ** 显著性水平: $p < 0.01$ 。

2.2 流域水量平衡分析

流域水量平衡分析对认识研究区水循环具有重要意义, 是进行水资源科学评价与合理配置的基础^[21]。

对于一个闭合的流域, 在没有跨流域调水的情况下, 一定时段内的流域水量平衡方程可简单表述为:

$$\Delta W = P - R - E$$

式中: P ——时段内降雨量(mm); R ——时段内流域总径流量(包括地表径流和河川基流, mm); E ——时段内流域总蒸散量(包括水面蒸发、土壤蒸发、植被蒸腾和潜水蒸发, mm); ΔW ——流域内土壤蓄水变化量, mm)。在不同水文年, ΔW 值有正有负。因此对多年平均来说, ΔW 值趋近 0, 即流域水量平衡关系可简化为多年平均的降水量 = 蒸发量 + 径流量。表 3

为 2004—2009 年研究区流域水量平衡分析结果。从表 3 可以看出, 降雨为研究区唯一的水分来源, 是唯一的收入项。流域年径流量较小, 年径流量占年降雨量的比例仅为 1.60%~2.66%, 可见蔡家川流域表现出了良好的水源涵养的能力。

将流域内的年蒸散量和年土壤蓄水变化量统看作流域年消耗量。蔡家川流域地处黄土高原, 热量充足, 年蒸散量较大而土壤蓄水变化量小。如 2008 年 11 月至 2009 年 10 月流域总蒸散量占同期降雨量的 94.04%, 土壤蓄水变化量仅为同期降雨量的 4.08%。同类地区的研究^[22-23]亦表明, 流域年蒸散量是水循环过程中的主要支出项。而与年蒸散量相比, 年土壤蓄水变化量仅占年降水量的一小部分。因此年消耗量也可以近似作为年蒸散量。从表 3 看出, 流域年消耗

量占年降水量的 97.34%~98.39%,是流域水分输出的主要部分。这样的水量分配关系表明研究区流域

降水量主要分配给植被蒸腾、土壤蒸发和少量的径流上。

表 3 2004—2009 年试验流域水量平衡

年份	降雨量 P		径流量 R		消耗量 W	
	P/mm	占总收入的比例/%	R/mm	占总支出的比例/%	W/mm	占总支出的比例/%
2004	392.20	100	8.61	2.20	383.59	97.80
2005	440.60	100	7.17	1.63	433.43	98.37
2006	597.60	100	15.90	2.66	581.70	97.34
2007	550.09	100	14.30	2.60	535.79	97.40
2008	396.50	100	10.28	2.59	386.22	97.41
2009	460.50	100	7.39	1.60	453.11	98.39

3 结论

(1) 研究区流域年径流明显较少,年径流系数只有 1.60%~2.66%。与同类地区^[24-26]相比,本研究地区的径流系数明显偏低。这可能是因为在高植被覆盖率(80%)条件下,研究区流域的绝大部分雨水被林冠层、枯枝落叶层等拦蓄,从而大大减少了河川径流量。因此,黄土区大面积的全面造林在很好地防治土壤侵蚀的同时,减少了流域的产水量。

(2) 通过对流域水量平衡分析可以看到,流域蒸散耗水是水循环过程中的主要支出项,占同期降水量的比例为 97.34%~98.39%。而在干旱半干旱的黄土地区,水分是植被建设的主要限制因子^[22]。故在森林有效拦蓄降水的同时,如何充分发挥林分水源涵养作用、减少蒸散耗水量才是关键。因此在黄土区水土保持林营造中,应当选用耗水量少、抗旱力强的树种,并适当控制林分密度如采用间伐等管理方式,来减少林木蒸腾量,达到植被水分供耗动态平衡,从而水土保持功能持续稳定。

(3) 对研究区流域径流量、洪峰流量与雨量级、雨强级进行分析可以看出,径流、洪峰随雨量雨强分级具有明显的跳跃式变化。在 $P < 10 \text{ mm}$, $I_{60} < 10 \text{ mm/h}$ 时,降水对径流、洪峰的影响很弱;在 $P \geq 30 \text{ mm}$, $I_{60} \geq 20 \text{ mm/h}$ 时,产流大、高洪峰,易造成土壤侵蚀,威胁土地生产力。这与张建军^[16]等在同类地区的研究结果一致。蔡家川流域 2004—2009 年间, $P \geq 30 \text{ mm}$ 的降雨有 13 场, $I_{60} \geq 20 \text{ mm/h}$ 的降雨有 3 场,这是引起水土流失的主要降雨,因而主要应针对此时的降雨特征进行防治。

(4) 不同雨型下流域径流差异显著。与其他雨型相比,A 型降雨条件下洪峰流量最大,而 C 型降雨条件下径流量最大。为了确定不同降雨类型条件下雨量、雨强对径流洪峰的贡献大小,对数据进行标准

化处理,建立不同降雨类型条件下的径流量、洪峰流量与降雨量 P ,平均雨强 $I_{\text{均}}$,最大 10 min 雨强 I_{10} ,最大 30 min 雨强 I_{30} ,最大 60 min 雨强 I_{60} 的多元回归模型。结果表明,与其他雨型相比,A 型降雨条件下雨强对洪峰流量的贡献率(47.12%)最大,C 型降雨条件下雨量对径流量的贡献率(28.5%)最大。但由于研究期内 C 型降雨发生的次数较少,其回归分析结果还需要更多数据作进一步验证。

[参 考 文 献]

- [1] 刘建梅,裴铁璠. 水文尺度转换研究进展[J]. 应用生态学报,2003,14(12):2305-2310.
- [2] Sangdan K, Suhee H. Urban stormwater capture curve using three-parameter mixed exponential probability density function and NRCS runoff curve number method[J]. Water Environment Research, 2010,82(1):43-50.
- [3] Brodie I M, Misra R K. Evaluation of greenwaste mulch to control runoff quality from landfill sites during frequent storms[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2009, 201(1/4):75-85.
- [4] Vilmante K, Sigita S, Danute E M, et al. The impact of storm water runoff on a small urban stream[J]. Journal of Soils and Sediments, 2009, 9(1):6-12.
- [5] Arie B Z. Rainfall intensity-duration-frequency relationships derived from large partial duration series[J]. Journal of Hydrology, 2009,367(1/2):104-114.
- [6] Hammad A H A, Berresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean[J]. Soil and Tillage Research, 2006,87(1):39-47.
- [7] Cheng J H, Zhang H J, Zhang Y Y, et al. Effects of preferential flow on soil-water and surface runoff in a forested watershed in China[J]. Frontiers of Forestry in China, 2009,4(2):132-139.
- [8] Chu X Y, Wang Y J, Xia Y P, et al. Generation of runoff characteristics over three time periods for four typical

- forests in Jinyun Mountain, Chongqing City, southwest China[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2009, 4(2): 171-177.
- [9] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4):161-168.
- [10] Cattani P, Ruy S M, Cabidoche Y M, et al. Effect on runoff of rainfall redistribution by the impluvium-shaped canopy of banana cultivated on an Andosol with a high infiltration rate [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 368(1/2/3/4): 251-261.
- [11] 屈丽琴,雷廷武,赵军,等. 室内小流域降雨产流过程试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12):25-30.
- [12] 李广,黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11):85-90.
- [13] 张升堂,康绍忠,张楷. 黄土高原水土保持对流域降雨径流的影响分析[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(6):56-59.
- [14] 琚彤军,刘普灵,徐学选,等. 不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J]. *泥沙研究*, 2007(4):65-71.
- [15] 潘成忠,上官周平. 黄土区次降雨条件下林地径流和侵蚀产沙形成机制:以人工油松林和次生山杨林为例[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9):1597-1602.
- [16] 张建军,朱金兆,魏天兴. 晋西黄土区坡面水土保持林地产流产沙的观测分析[J]. *北京林业大学学报*, 1996, 18(3):14-20.
- [17] 王万忠,焦菊英. 黄土高原坡面降雨产流产沙过程变化的统计分析[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(5):21-27.
- [18] 张建军,董煌标,纳磊,等. 晋西黄土区不同尺度小流域降雨径流过程的对比分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2):106-112.
- [19] 段青松,吴伯志,字淑慧. 滇中地区小流域治理前后水土流失变化规律的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5):42-46.
- [20] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J]. *生态学报*, 2006, 26(11):3847-3853.
- [21] 朱新军,王中根,夏军,等. 基于分布式模拟的流域水平衡分析研究:以海河流域为例[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(4):23-27.
- [22] 毕华兴,李笑吟,李俊,等. 黄土区基于土壤水平衡的林草覆被率研究[J]. *林业科学*, 2007, 43(4):17-23.
- [23] 朱金兆,魏天兴,张学培. 基于水分平衡的黄土区小流域防护林体系高效空间配置[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(5/6):5-13.
- [24] 黄明斌,刘贤赵. 黄土高原森林植被对流域径流的调节作用[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(9):1057-1060.
- [25] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应:以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[J]. *生态学报*, 2008, 28(2):636-644.
- [26] 王盛萍,张志强,孙阁,等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应:以甘肃天水吕二沟流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1):48-54.

(上接第 41 页)

[参 考 文 献]

- [1] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控[M]. 北京:科学出版社, 1990:118-134.
- [2] 赵京考,刘作新,韩永俊. 土壤团聚体的形成与分散及其在农业生产上的应用[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(6):163-166.
- [3] 章明奎,何振立. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4):359-365.
- [4] 李成亮,孔宏敏,何园球. 施肥结构对旱地红壤有机质和物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6):116-119.
- [5] 姚贤良,许绣云,于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成[J]. *土壤学报*, 1990, 27(1):25-33.
- [6] Van Bavel C H M. Mean weighted-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1949, 14(6):20-23.
- [7] Jastrow J D, Miller R M, Lussenhop J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, 30(7):905-916.
- [8] 刘京,常庆瑞,李岗. 连续不同施肥对土壤团聚性影响的研究[J]. *水土保持通报*, 2000, 8(4):24-26.
- [9] 史吉平,张夫道,林葆. 长期定位施肥对土壤有机无机复合状况的影响[J]. *植物营养与肥料报*, 2002, 8(2):131-136.
- [10] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径重量分布表征土壤的分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [11] 黄欠如,胡锋,袁颖红. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响[J]. *土壤*, 2007, 39(4):614-613.
- [12] 徐阳春,沈其荣,郭泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影[J]. *土壤学报*, 2003, 40(4):593-598.
- [13] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregate in soil[J]. *J. Soil Sci.*, 1982, 33(2):141-163.
- [14] Six J, Elliott E T, Paustian K, Doran J W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grass land soils[J]. *Soc. Am. J.*, 1998, 62(5):1367-1377.
- [15] 周虎,吕贻忠,杨志臣. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9):1973-1979.
- [16] 陈恩凤,关连珠,汪景宽. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1):49-53.