

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^{*}

李耀明, 王玉杰, 储小院, 成晨, 齐娜

(水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 根据 2004—2006 年在缙云山地区的定位观测数据, 分析降雨因子与针阔混交林、常绿阔叶林、楠竹林和灌丛 4 种典型森林植被类型地表径流量的关系。结果表明: ①地表径流与降雨量和 10 min 最大雨强关系极其显著, 与平均雨强关系显著, 与前 3 天降雨量和降雨历时关系不显著; ②地表径流与降雨量间存在二次函数关系, 与 10 min 最大雨强和降雨强度间分别存在一次函数关系; ③不同的森林植被类型对降雨的响应不同, 在较小降雨条件下, 各植被类型都能很好的调节降雨, 但在较大降雨条件下, 各植被类型对于雨水的调节作用差别较大, 常绿阔叶林拦截降雨、调蓄洪水能力最强, 楠竹林的最差。④通过主成分分析, 对地表径流起着制约性的影响因素有降雨强度综合因子、降雨历时与降雨量综合因子和前期降雨的综合因子, 用主成分作为变量建立模型, 通过检验发现拟合度较高, 能准确推求和预测分析地表径流。

关键词: 三峡库区; 降雨因子; 地表径流; 主成分分析

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)04-0244-05

Effects of the Rainfall Factors on Surface Runoff of Typical Forest Vegetations in Three Gorges Region

LI Yao-ming, WANG Yu-jie, CHU Xiao-yuan, CHENG Chen, QI Na

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education,
College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 10083, China)

Abstract: Based on locating observation in Jinyun Mountain region during 2004—2006, the relation between the rainfall factors and surface runoff of 4 typical forest vegetation types including coniferbroad leaved mixed forest, evergreen broad-leaved forest, phyllostachy pubescens forest and scrub was analyzed. Results showed the relation between surface runoff and rainfall, the maximum intensity of rainfall in 10 min is extremely significant, and rainfall intensity was significant, rainfall duration and rainfall of 3 days ago was not significant. The relation between surface runoff and rainfall is quadratic equation, and relation between surface runoff and the maximum intensity of rainfall in 10 min, rainfall intensity is linear function. Different types of forest vegetation showed up different response to the rainfall, in light rain conditions, each type of vegetation is good for rainfall storage, but in heavy rain conditions, every type of vegetation is much different in hydrological function, evergreen broad-leaved forest is the best and phyllostachy pubescens forest is the worst. By using principal component analysis, the factors that have restrictive impact on surface runoff are rainfall intensity comprehensive factor, rainfall duration and rainfall comprehensive factor and antecedent rainfall comprehensive factor. With selecting main constituent as variable making models, the degree of fitting is high. Using these models can carry out an accurate calculation and forecasting of surface runoff.

Key words: Three Gorges Reservoir; rainfall factors; surface runoff; principal component analysis

^{*} 收稿日期: 2008-12-19

基金项目: “十一五”林业科技支撑计划项目(2006BAD03A1802)

作者简介: 李耀明(1983—), 男, 甘肃陇西人, 在读硕士, 主要研究方向为水土保持。E-mail: 02134103@163.com

通信作者: 王玉杰(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为森林水文、土壤侵蚀。E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn

坡面地表径流(Surface Runoff)是坡面供水与下渗的矛盾产物,属于整个坡面径流(Runoff)的重要组成部分^[1]。降雨过程对于径流特征有着重要影响^[2-4],很多学者对坡面产流特征受到林分结构、降雨特性、地形、土壤前期含水、枯落物层饱和度等多种因素的影响进行了研究^[5-12]。杨学震通过对南方山地红壤区的研究表明影响径流量的主要因子有瞬时雨率、植被盖度、峰值时间、降雨历时等^[13];袁建平等采用人工模拟降雨装置研究了林地、农地、裸地中诸多因子对产流的影响,表明林地影响产流历时的主要降雨因子为承雨强度^[14];金雁海等对内蒙古不同地区 64 个径流小区观测研究表明降雨量和降雨强度与径流量成正相关关系^[15]。

以三峡库区典型森林植被类型为研究对象,通过对针阔混交林(I)、常绿阔叶林(II)、楠竹林(III)和灌丛(IV)4 种植被类型地表径流和降雨特征各指标的观测,在视地面因子相对不变的情况下,研究分析了降雨因子对不同植被类型地表径流的影响,这对于长江三峡理水调洪型森林植被建设、控制洪水过程有重要的理论和现实指导意义。

1 研究区概况

缙云山自然保护区位于重庆市北碚区境内,嘉陵江三峡之温塘峡西岸,东经 $106^{\circ}17' - 106^{\circ}24'$,北纬 $29^{\circ}41' - 29^{\circ}52'$,海拔 350~951.5 m。该保护区具有亚热带季风湿润性气候特征,年平均气温 13.6°C ,年均日照 1 293.9 h,相对湿度年平均 87%,年平均降雨量 1 611.8 mm,年平均蒸发量 777.1 mm。土壤以三叠纪须家河组厚层石英砂岩、灰质页岩和泥质页岩为母质风化而成的酸性黄壤及水稻土。植物资源丰富,主要优势种为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、丝栗(*Castanopsis fargesii*)、华山松(*Pinus armandii*)、大头茶(*Gordonia axillaris*)和山矾(*Symplocos setchuanensis*)等。

2 研究方法

降雨观测采用小气象站自动采集数据,使用 B-432-Z 型自记雨量计观测降雨量、降雨强度、降雨历时、10 min 最大雨强。径流观测是在研究区内 4 种代表性森林植被群落中设置标准径流小区(5 m × 20 m),四周围墙采用混凝土预制板,围墙下端为集流槽。在径流小区内,降雨产生的地表径流在集流槽聚集,水流通过集流槽下端导管进入观测房,每个观测房配置了监测径流变化状况的自动记录仪器

(LT 9801A 数据记录仪),该仪器是采集和记录 1~5 路径流量数据的智能型长期自动记录仪器。采用新型低功耗单片计算机及大容量半导体存储器及精确的实时时钟构成低功耗的数据采集存储系统,可以在无人职守的情况下长期自动连续观测记录。

为了研究不同降雨条件下降雨因子对缙云山各典型森林植被坡面地表径流的影响,从 2004-2006 年监测数据中选取数据完整、径流效应明显的典型降雨 140 场,对于降雨因子统计其降雨量 $P(\text{mm})$ 、降雨历时 $T(\text{min})$ 、降雨强度 $I(\text{mm/min})$ 、10 min 最大雨强 $I_{10}(\text{mm/min})$ 、前 3 d 降雨量 $P'(\text{mm})$,对于径流因子分别统计 4 个小区的地表径流量 $Q(\text{mm})$ (见表 1),采用 SPSS 软件中双变量相关分析(Bivariate Correlations)、线性回归分析(Liner Regression)、主成分分析(Principal Component Analysis)等数学统计方法。

对于降雨等级的划分,按照北京林学院^[16]提出的降雨划分标准,将降雨划分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨划分为 5 个雨量级,其中小雨 103 场,中雨 23 场,大雨、暴雨和大暴雨共 14 场。

3 结果与分析

3.1 降雨与地表径流相关分析

为了避免实测数据数量级和量纲不同造成的影响,对 4 种森林植被类型的地表径流量和降雨因子等 6 个指标的实测值分别进行标准化。采用标准化方法是把每一组各原始数据减去其平均值,再除以其标准差,计算公式如式(1)。

$$x = \frac{x_{ij} - \bar{x}}{s_j} \quad (1)$$

式中: x ——标准化值; x_{ij} ——实测数值; s_j ——第 j 列的标准差。

对径流和降雨量各因子的标准化值进行皮尔逊(Pearson)相关分析,均能通过双侧显著性 T 检验,分析结果见表 2。

从分析结果可以看出:①部分降雨因子与径流有密切的线性关系,达到显著或极显著的水平;②通过分析单个因子和径流的关系,对于研究区 4 种森林类型,影响径流量的主要因子为降雨量因子和 10 min 最大雨强因子,分别呈现出极显著的正相关关系,表明出现次降雨量较大或雨强较大的降雨,土壤含水量很快达到饱和,降雨不能被土壤完全储存和吸收,绝大部分形成了地表径流;③地表径流与降雨强度间存在显著正相关关系,表明雨强愈大,降雨就越易形成径流,其径流量越大;④地表径流与前 3 天

降雨量和降雨历时关系不显著,这是因为在南方地区土壤剖面并不深厚、土层相对比较疏松,降雨产流以蓄满产流为主^[17-18],当降水速度大于稳渗速度时就可产生地表径流。

表 1 降雨因子与缙云山地区 4 种典型森林植被地表径流值

编号	降雨量/ mm	降雨历时/ min	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	前期三天 降雨量/mm	10 min 最大雨强/ (mm·min ⁻¹)	地表径流/mm			
						I	II	III	IV
1	9.4	210	2.69	11.7	0.22	0.4313	0.3899	0.8950	0.2634
2	19.2	420	2.74	64.8	0.49	0.8489	0.2242	0.4696	0.3951
3	13.1	300	2.64	19.1	0.11	0.3972	0.3412	—	0.5845
4	21.0	360	3.50	0	0.26	0.4955	0.3119	0.4165	0.4939
5	48.6	780	3.74	13.8	0.58	8.3818	2.9439	—	8.7177
6	3.8	60	3.80	59.9	0.13	0.0227	0.0390	0.0620	0.0247
7	32.2	480	4.03	21.8	0.25	1.7541	0.5654	3.3760	0.7162
8	37.2	540	4.13	21.0	0.34	1.7513	0.9163	7.0091	1.0949
9	2.2	30	4.40	16.9	0.13	0.0825	0.0292	—	0.0988
10	19.8	240	4.95	58.9	0.47	0.7115	0.4387	1.1165	0.5598
11	8.2	90	5.47	59.7	0.40	0.2756	0.1755	0.2127	0.2305
12	1.5	180	0.50	3.8	0.03	0.0099	0.0097	0.0266	0.0165
13	11.7	1140	0.62	0	0.06	0.2529	0.1365	0.2392	0.0906
14	5.0	480	0.63	159.3	0.05	0.0665	0.0682	0.1772	0.107
15	5.1	420	0.73	74.2	0.03	0.1279	0.0195	0.0975	0.1317
16	3.7	300	0.74	4.8	0.04	0.0636	0.0585	0.0797	0.0741
17	11.5	900	0.77	0.7	0.06	0.2671	0.2340	0.3633	0.2387
18	4.6	300	0.88	7.5	0.03	0.0739	0.0195	0.0886	0.0741
20	90.0	1020	5.29	127.0	67.80	10.5647	2.3785	38.3680	17.1207
.....									
140	57.2	360	9.53	4.9	0.62	3.1266	1.4427	18.5240	2.1897

表 2 不同森林类型地表径流与降雨因子相关系数

降雨因子 植被类型	<i>P</i>		<i>T</i>		<i>I</i>		<i>P'</i>		<i>I</i> ₁₀	
	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
I	0.747* *	0.008	0.203	0.210	0.309*	0.049	0.145	0.372	0.693* *	0.007
II	0.618* *	0.004	0.079	0.626	0.286*	0.034	0.032	0.846	0.532* *	0.009
III	0.686* *	0.004	0.142	0.383	0.413* *	0.008	0.093	0.568	0.605* *	0.005
IV	0.663* *	0.006	0.110	0.499	0.365*	0.012	0.065	0.688	0.587* *	0.009

注: * * 极显著性水平, * 显著性水平, *r* 相关系数, *p* 双侧检验值。

3.2 地表径流与降雨量的关系

通过对历年降雨观测数据统计,次降雨量大于 50 mm 的降雨只占总降雨量的 25%,但是这些降雨所产生的地表径流量接近于 50%,表明径流量主要是由次降雨量大的大暴雨决定的。在缙云山地区,大暴雨主要集中在 7—9 月,因此径流量分布具有很明显的季节分布。分别分析不同降雨条件下的地表径流与降雨量的关系,建立之间的回归模型,其经验公式可表示如式(2)。

$$Q=\alpha+\beta_1P^2+\beta_2P$$

(2)

式中: *Q*——地表径流量 (mm); *P*——降雨量 (mm); α , β_1 , β_2 ——回归系数。

各森林类型参数见表 3。

可以看出,降雨量与径流量间存在二次抛物线型回归关系,相关系数 *R* 均大于 0.9,方程相关性显著性强,说明地表径流量随着降水量的增加而增加,但不是匀速增加的。根据实测数据作出拟合曲线(见图 1),可根据一场降雨总降雨量推估出不同植

被类型地表径流量。在小雨条件下, 4 种植被类型地表径流量差别不明显, 曲线变化平缓, 说明降雨量较小时, 各植被类型都对降雨有很好的调蓄能力; 在中雨条件下, 当降雨量增加到 20 mm 以上时, 楠竹林径流量增加速度明显加快, 其他三种植被类型径流量随降雨量增加的趋势变化不明显; 大雨、暴雨和大暴雨条件下, 各植被类型径流量随着降雨量增加速度加快, 说明在较大降雨量情况下, 降雨几乎全部转化为地表径流。楠竹林地表径流量是其他林分的 2 倍以上, 其径流量表示为: 楠竹林> 针阔混交林> 灌丛> 常绿阔叶林。如编号为 19 和 120 的两场暴雨, 4 种植被类型所产生的径流量依次为楠竹林(38.368, 18.524 mm)、针阔混交林(10.564 7, 3.126 6 mm)、灌丛(17.120 7, 2.189 7 mm)、常绿阔叶林(2.378 5, 1.442 7 mm), 楠竹林地表径流量在常绿阔叶林的 10 倍以上。因此, 在降雨量尺度上, 常绿阔叶林具有较强拦蓄降雨、减小洪水的效果, 楠竹林调洪能力最差, 这与齐实、王云琦等^[19-20]对缙云山各森林群落理水调洪功能的动态评价结果是一致的。

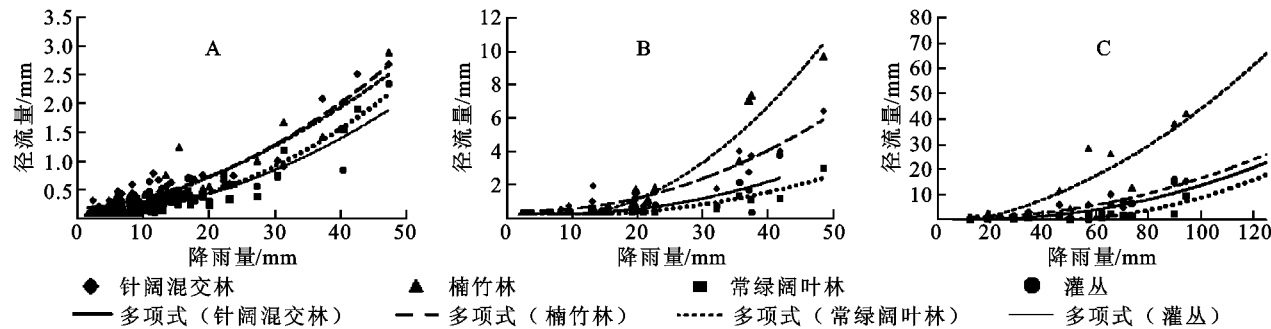


图 1 不同降雨条件下地表径流与降雨量关系

3.3 地表径流与 10 min 最大雨强的关系

很多学者研究表明, 不论是林地还是农地, 都具有消减降雨洪峰流量、推迟洪峰到来时间的作用, 从而影响到径流量的变化^[21-23]。通过分析, 在不同降雨条件下, 径流量受 10 min 最大雨强影响的差别不大, 都成 $Q = \alpha + \beta I_{10}$ 的一次线性相关关系(见表 4)。

表 4 地表径流量与 10 min 最大雨强间的回归方程经验参数

植被类型	α	β	R
I	- 0.075	3.347	0.822
II	- 0.130	1.223	0.750
III	- 0.103	6.652	0.747
IV	- 0.115	3.438	0.753

地表径流量与 10 min 最大雨强间存在一定的线性正相关关系, 但是显著性较弱。通过回归方程可以看出, 地表径流量随着 10 min 最大雨强的增大而增加, 表明出现瞬时雨强较大的降雨时, 容易出现

表 3 不同降雨条件下地表径流量与降雨量的关系模型参数值

降雨类型	林分类型	α	β_1	β_2	R
A	I	- 0.152	0.001	0.009	0.956
	II	- 0.038	0.0008	0.008	0.947
	III	- 0.007	0.0006	0.023	0.947
	IV	0.045	0.0008	0.004	0.927
B	I	- 0.411	0.002	- 0.015	0.953
	II	- 0.228	0.001	- 0.022	0.923
	III	- 0.197	0.005	- 0.068	0.966
	IV	- 0.363	0.001	- 0.028	0.929
C	I	- 1.148	0.001	- 0.028	0.964
	II	- 3.612	0.002	- 0.194	0.956
	III	- 2.500	0.003	0.140	0.951
	IV	- 0.664	0.001	- 0.055	0.904

注: A 表示小雨, B 表示中雨, C 表示大雨、暴雨和大暴雨, 下同。

流量较大的地表径流。其中在各林分中楠竹林增加速度最快明显比其他植被类型要快。通过分析径流峰值受 10 min 最大雨强的影响表明, 在相同暴雨条件下(如 $I_{10} = 0.21 \text{ mm/min}$), 各植被类型地表径流峰值依次为楠竹林(0.010 6 mm/min)> 灌丛(0.006 6 mm/min)> 针阔混交林(0.005 8 mm/min)> 常绿阔叶林(0.004 9 mm/min), 表明各植被类型都有很好削减洪峰的功能, 其中常绿阔叶林最好, 楠竹林最差, 这与 3.2 中分析结果一致。

3.4 地表径流与降雨强度的关系

为了定性说明地表径流与降雨强度间的关系, 在不同降雨条件下, 分别对 4 种植被类型地表径流量与降雨强度进行回归分析, 以一次线性函数关系拟合度最高(见表 5)。

很明显, 较小和较大降雨的径流量与降雨强度线性关系显著性较小, 而中等降雨则显著性较强。这是因为, 在中等降雨条件下, 降雨历时较长, 降雨

能够充分入渗从而产流。但在降雨量较小时,包气带的蓄水作用能够充分发挥,所有的降雨几乎都能被土壤吸收,下渗形成土壤水和壤中流;相反,降雨强度较大时,包气带几乎被蓄满,稳渗以外的降雨全部形成地表径流,这两种情况都可能导致与降雨强度关系不大。从表 4 中植被类型来看,在小雨和中雨条件下,相同降雨强度产生的地表径流量依次为楠竹林> 针阔混交林> 常绿阔叶林> 灌丛,大雨、暴雨和特大暴雨条件下为楠竹林> 针阔混交林> 灌丛> 常绿阔叶林,不同的雨强条件下,均是楠竹林地表径流量最大。灌丛在降雨强度较小的情况下对雨水的拦截能力最强,这是因为灌丛枝叶繁茂阻止了林外降雨的穿透,部分降雨到达林冠后直接蒸发;但在较大强度降雨下,常绿阔叶林仍然表现出较好的调洪功能,根据回归方程,在平均雨强为 10 min/h 的暴雨下,各林分地表径流依次为常绿阔叶林(2.733 mm)、灌丛(6.568 mm)、针阔混交林(6.63 mm)、楠竹林(25.63 mm),与上文分析结果一致。

表 5 地表径流量与降雨强度间的回归方程经验参数

降雨类型	植被类型	α	β	R
A	I	- 0.352	0.235	0.561
	II	- 0.035	0.206	0.371
	III	- 0.143	0.413	0.425
	IV	- 0.011	0.170	0.329
B	I	- 0.594	0.420	0.810
	II	- 0.422	0.234	0.846
	III	- 2.824	1.008	0.778
	IV	- 0.414	0.232	0.801
C	I	- 1.480	0.811	0.426
	II	- 0.567	0.330	0.371
	III	- 10.280	3.591	0.444
	IV	- 2.182	0.875	0.338

3.5 降雨因子综合分析

从以上分析来看,有些降雨因子和径流因子间呈显著的线性相关关系,但有些关系不显著,这是因为这些因子不是相互独立的,而是存在一定的相关关系。为了简化分析,找到径流与多种降雨因子的相关关系,对 5 项降雨因子在上文中的标准化值做主成分分析,采用方差最大旋转(Varimax),使每个因子上的具有最高荷载的变量数最小,可以简化对因子的解释,分析结果见表 6。

特征根大于 1 的为第 1 主成分和第 2 主成分,前 2 个主成分累计贡献率小于 85%,不足以反映降雨的整体信息。因此,选用前 3 个主成分的特征向

量分析,其累计贡献率达到了 95.287%,包括了降雨因子的大部分信息,直接制约着地表径流的变化特征。第 1 主成分中降雨强度和 10 min 最大雨强具有较大的荷载值,因此第 1 主成分是反映降雨强度的综合指标;第 2 主成分量中降雨历时和降雨量在有较大荷载值,该主成分量是反映降雨历时和降雨量的综合指标;第 3 主成分量中前期降雨的荷载值最高,该主成分量是反映前期降雨的综合指标。

表 6 各降雨因子主成分分析值

主成分	$Y(1)$	$Y(2)$	$Y(3)$	$Y(4)$	$Y(5)$
P	0.405	0.506	- 0.040	0.759	- 0.049
T	- 0.097	0.977	- 0.056	0.183	0.010
I	0.975	- 0.100	- 0.086	0.163	- 0.070
P'	- 0.054	- 0.053	0.997	- 0.015	0.003
I_{10}	0.766	0.062	0.020	0.580	0.271
特征根	2.466	1.312	0.986	0.175	0.061
贡献率/ %	49.329	26.236	19.721	3.500	1.214
累计贡献率/ %	49.329	75.565	95.287	98.786	100.000

注: $Y(1)$ 为第 1 主成分, $Y(2)$ 为第 2 主成分... $Y(5)$ 为第 5 主成分。

为了简化模型,我们取前 3 个主成分量为降雨的综合指标对径流因子做多元回归分析,其回归模型如下:

$$Q_I = 0.253Y(1) + 0.455Y(2) + 0.151Y(3) - 1.651 \times 10^{-8}, R = 0.913$$
$$Q_{II} = 0.211Y(1) + 0.354Y(2) + 0.011Y(3) + 1.484 \times 10^{-7}, R = 0.911$$
$$Q_{III} = 0.276Y(1) + 0.366Y(2) + 0.153Y(3) - 1.087 \times 10^{-7}, R = 0.899$$
$$Q_{IV} = 0.192Y(1) + 0.408Y(2) + 0.128Y(3) - 1.682 \times 10^{-7}, R = 0.905$$

用主成分作为变量使方程得到简化,且方程拟合度较高,利用上述方程,可根据其降雨特征值计算不同森林植被类型下产生的径流量,为长江三峡库区理水调洪型森林植被建设和防洪减灾、保持水土提供参考依据。

4 结 论

(1) 通过双变量相关分析表明:降雨因子中与地表径流关系密切程度依次是降雨量> 10 min 最大雨强> 平均雨强> 降雨历时> 前 3 天降雨量,其中降雨量与 10 min 最大雨强和径流量间存在极显著的正相关关系,表明出现次降雨量较大或者瞬时雨

强较大的降雨时, 容易出现流量较大的地表径流。

(2) 地表径流与降雨量间存在极显著的二次线性关系, 小雨和中雨条件下, 地表径流对降雨量增加变化缓慢, 但在大雨、暴雨和大暴雨条件下随降雨量的增加迅速增加; 10 min 最大雨强与地表径流之间均存在着一次线性函数关系, 表明瞬时雨强大的降雨容易产生地表径流; 平均雨强在不同的降雨条件下与地表径流量的一次线性关系显著性不同, 在中雨条件显著性较强, 在小雨和大雨条件下显著性弱。

(3) 不同的森林植被类型对降雨的响应不同, 在较小降雨条件下, 各植被类型都能很好的调节降雨, 但在较大降雨条件下, 各植被类型对于雨水的调节作用差别较大, 相比而言, 在缙云山地区 4 种植被类型中, 常绿阔叶林拦截降雨、调蓄洪水能力最强, 楠竹林的最差。

(4) 通过主成分分析, 对地表径流起制约性的影响因素有降雨强度综合因子、降雨历时与降雨量综合因子和前期降雨的综合因子, 其主成分累计贡献率高达 95.287%。用主成分作为变量与地表径流进行回归分析, 呈一次线性关系, 且方程的拟合度高, 可准确推求地表径流。

仅分析了降雨因子与地表径流的关系, 但影响地表径流的因子复杂多样, 对于径流的受降雨因子和地面因子的综合影响有待于进一步研究, 以系统分析三峡库区各植被类型对暴雨的响应。

参考文献:

- [1] Mosley M P. Streamflow generation in a forested watershed[J]. J. Hydrology, 1975, 15(4): 19-26.
- [2] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其相关因素[J]. 水土保持通报, 1981, 1(3): 1-9.
- [3] 吴发启, 赵晓光, 刘秉正, 等. 黄土高原南部缓坡地降雨与侵蚀的关系[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 53-60.
- [4] 据彤军, 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, 8(4): 65-67.
- [5] 余新晓, 于志民. 水源保护林培育、经营、管理、评价[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [6] Andreassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate[J]. Journal of Hydrology, 2004, 291: 1-27.
- [7] Jones J A, Grant G E. Peak flow response to clear-cutting and roads in small and large basin, western Cascade, Oregon[J]. Water Resources Research, 1996, 32(4): 959-974.
- [8] 刘玉洪, 张一平, 马友鑫, 等. 西双版纳橡胶人工林地地表径流与地下径流的关系[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2002, 12(6): 75-77.
- [9] 申卫军, 周国逸, 彭少麟, 等. 南亚热带鹤山 5 种生态系统的径流[J]. 热带亚热带植物学报, 1999, 7(4): 273-281.
- [10] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 474-480.
- [11] 袁建平. 影响坡地降雨产流历时的因子分析[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 259-264.
- [12] 马琨. 模拟暴雨下红壤坡面产流产沙及养分流失特征研究[J]. 宁夏农学院学报, 2004, 25(1): 1-41.
- [13] 杨学震. 影响坡地径流的若干因子与径流量的数量化回归分析[J]. 福建水土保持, 1996(4): 37-41.
- [14] 袁建平, 蒋定生, 甘淑. 影响坡地降雨产流历时的因子分析[J]. 山地学报, 1999, 8(3): 260-263.
- [15] 金雁海, 柴建华, 朱智红, 等. 内蒙古黄土丘陵区坡面径流及其影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 292-294.
- [16] 北京林学院. 气象学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1981.
- [17] 胡实, 谢小丽, 王凯荣. 红壤坡地不同土地利用类型地表产流特征[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 4(23): 24-28.
- [18] 周国逸, 闫俊华, 申卫军, 等. 马占相思人工林和果园地表径流规律的对比研究[J]. 植物生态学报, 2000, 4(24): 451-458.
- [19] 齐实, 王云琦, 孙阁, 等. 三峡库区森林小流域森林水文调洪功能模拟研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 9(5): 42-51.
- [20] 王云琦, 王玉杰, 朱金兆, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型坡面产流对暴雨的响应[J]. 中国水土保持科学, 2005, 12(5): 19-26.
- [21] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展[J]. 世界林业研究, 1998(6): 6-23.
- [22] 刘昌明, 曾燕. 植被变化对产水量影响的研究[C]//中国水利杂志专家委员会会议暨水资源管理与可持续发展高层研讨会论文集. 2002: 112-116.
- [23] 李文华, 何永涛, 杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾和展望[J]. 自然资源学报, 2001, 11(5): 390-406.