

# 黔中喀斯特山地不同森林类型的 地表径流及影响因素

张喜<sup>1,2</sup>, 薛建辉<sup>1</sup>, 许效天<sup>2,3</sup>, 连宾<sup>4</sup>, 李克之<sup>2,3</sup>

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550011;

3. 贵州大学, 贵阳 550001; 4. 中国科学院贵阳地球化学研究所, 贵阳 550002)

**摘要:**采用固定样地定位监测方法,于2001-2005年研究了黔中喀斯特山地不同森林类型对地表径流的影响。结果表明,不同林分类型的年地表径流量均值为11.108 mm、林分类型间变幅为1.765-22.934 mm、年际间变幅为10.553-11.699 mm,退耕还林幼林(22.934 mm)>针叶林(17.236 mm)>针阔混交林(10.770 mm)>阔叶林(8.876 mm)。不同森林类型年地表径流量的季节变化为夏季>春季>秋季>冬季,同降雨量的季节变化趋势相一致。与同生物气候带、不同生物气候带森林相近类型的径流量规律相似,反映出黔中喀斯特山地森林与其它森林地表径流量规律的相似性。其中喀斯特山地森林中灌木林地表径流量与其它地带性和非地带性森林中灌木林地表径流量变化的相异性又反映出黔中喀斯特山地森林地表径流的特殊性,这种特殊性主要是成土母岩造成的。地表径流系数的季节变化趋势中,退耕还林幼林为夏季>春季>秋季>冬季,针叶林和针阔混交林为夏季>春季>冬季>秋季,灌木林和阔叶林为春季>夏季>冬季>秋季,这种差异与不同林分类型组成树种的生活型有关。旬地表径流量与反映温度和水分的气象指标间的单相关性达显著水平,多元回归方程模拟表明衡量温度的相关指标对地表径流量的贡献率高于降水,这反映了温度对近地气团的控制作用,进而影响区域降水和林地径流量。森林不同层片特征对地表径流量的影响具有互补性和抑制性,受森林群落组成、结构和发育的共同影响。年地表径流量受小生境和林地表层土壤特性的综合影响,地表径流量随坡度的增大而增加、随海拔的升高而降低,与毛管孔隙度和总孔隙度的负相关性达显著水平,多元回归方程模拟发现容重的贡献率达-96.54%。

**关键词:**喀斯特山地; 林分类型; 地表径流; 影响因素

**中图分类号:** S715.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3395(2007)06-0527-11

## Forest Surface Runoff and Its Influence Factors in Karst Mountainous Area in Center of Guizhou Province, China

ZHANG Xi<sup>1,2</sup>, XUE Jian-hui<sup>1</sup>, XU Xiao-tian<sup>2,3</sup>, LIAN Bin<sup>4</sup>, LI Ke-zhi<sup>2,3</sup>

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Guizhou Provincial Academy of Forestry, Guiyang 550011, China;

3. Guizhou University, Guiyang 550001, China; 4. Institute of Geochemistry, the Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Based on 5-year from 2001 to 2005 located observation in different types of forests in karst mountainous area in center of Guizhou Province, China, the annual surface runoff was from 1.765 to 22.934 mm in different forest types and from 10.553 to 11.699 mm in different observed years, with an average of 11.108 mm. The forest surface runoff changed in the order of young forest returned farmland (22.934 mm) > coniferous forest

收稿日期: 2006-10-30 接受日期: 2007-07-12

基金项目: 国家科技攻关计划(2001BA510B0305; 2004BA510B0305); 国家林业局重点项目(2001-13); 贵州省科技攻关项目(2002-1120); 贵州省林业攻关项目(2001-18)资助

致谢: 贵州省林业科学研究院的刘延惠、崔迎春、金明, 开阳县林业局的郑文志、杨小兰、李兴同志参加部分野外调查, 杨成华同志完成植物存疑标本鉴定, 谨此致谢。

(17.236 mm) > needle and broad-leaved mixed forest (10.770 mm) > evergreen and deciduous broad-leaved forest (8.876 mm), which is similar to forests in the same or another bio-climate zones. And it is the common character of karst and nonkarst mountainous forests. The karst shrub forest was different from nonkarst in surface runoff due to mother rock properties. Surface runoff of the types was Summer > Spring > Autumn > Winter, coincided with seasonal distribution of precipitation. Seasonal changing rule of surface runoff coefficients in young forest returned farmland was as same as seasonal distribution of surface runoff, and the rule in coniferous forest and needle and broad-leaved mixed forest was Summer > Spring > Winter > Autumn, and the rule in shrub forest and evergreen and deciduous broad-leaved forest was Spring > Summer > Winter > Autumn, and this difference was made by species composition and precipitation distribution. There existed remarkable correlation, accorded to line, between surface runoff in ten days and hydrological factors include precipitation, evaporation and relative humidity, and temperature factors include Max. and Min. and average temperature in air and surface and soil depth in 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm. Results of contribution ratio to surface runoff from multi-variances regression analyses was that temperature is higher than hydrology, and this indicated temperature affected flow of air mass near surface, and influenced further precipitation and forested surface runoff. Influence of layer characteristics in different forest types on annual surface runoff had mutual beneficent and repellency based on community component, structure and development. Annual surface runoff was affected complexly by micro-habitat and surface soil characteristics of plots, and increased by slope of plots rising, and decreased by altitude of plots rising, there had remarkable negative correlation between annual surface runoff and total porosity and capillary pore, and contribution ratio of volume weight to annual surface runoff was -96.54%, based on multi-variances regression analyses.

**Key words:** Karst mountainous area; Forest type; Surface runoff; Influence factors

水是生态系统中最为活跃而又不可替代的生态因素,是联系地球系统地圈-生物圈-大气圈的纽带,与森林的关系密切。水资源和森林资源匮乏是人类进入 21 世纪后所面临的重要资源和环境问题之一,森林与水相互交织的复杂关系历来是生态学和文学研究的热点<sup>[1-6]</sup>,水文过程与生态系统内植物群落变化有着相互制约的内在联系,水资源特性及利用方式所导致的区域水文过程变化,将不可避免地给区域生态环境体系产生影响,尤其是植被生态系统的变化,这种影响势必对区域水文过程产生进一步的作用。

以贵州为中心的中国南方喀斯特区,是世界上 3 大喀斯特地貌集中分布区之一。碳酸岩类岩层不仅纵向上发育、而且地表分布也较为集中,其覆盖面积占全省总面积的 73.6%,90% 的县市有分布<sup>[7]</sup>。由于喀斯特地区的母岩可溶性导致其成土层浅薄、零星分散、剖面发育不全,土壤容量小,对季节性降雨的蓄留能力差,极易造成水土流失;其近地表层岩溶带<sup>[8]</sup>岩溶动力条件优越、岩溶作用相对强烈、岩溶化程度较高并以相对完整的可溶岩部分为下界面,地下水的赋存空间主要为溶蚀裂隙、溶孔、溶

沟、溶槽,强风化带的风化节理、裂隙,可供植物生长利用的储水较少。因此,水、土管理问题已是喀斯特地区植被恢复、石漠化治理的关键点。本文研究黔中喀斯特山地不同森林类型地表径流的特征及影响因素,以探寻主控因素和分析调控机理,可为喀斯特山地水资源的保护和利用提供新的途径、为天然林保护和防护林体系建设工程提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究在贵州喀斯特生态站开阳试验区进行。该研究区位于黔中鱼梁河流域,流域面积为 1 034 km<sup>2</sup>,包括开阳县和乌当、白云、修文、息峰的部分地区。分为香火岩复合喀斯特峡谷、南江喀斯特峡谷和紫江喀斯特地缝试验区。地理位置为 26°53' - 27°03' N, 106°51' - 107°07' E, 海拔在 506 - 1 702 m 之间,喀斯特地貌占 72.2%。年均温为 10.6 - 15.3℃、年降雨量为 962.5 - 1 419.5 mm, ≥10℃ 的年积温为 1 562.7 - 2 278.2℃,日照时数为 898.1 - 1 084.8 h,无霜期有 224 - 295 d。主要土壤种类为黄色石灰土、红色石灰土、黑色石灰土、棕色石灰土、黄壤。地带性植被为

中亚热带常绿阔叶林,非地带性植被为中亚热带喀斯特常绿落叶阔叶混交林。

## 2 研究方法

### 2.1 观测样地及径流场设置

2001年,在香火岩试验区林班勾绘的基础上,

对169个林班资料聚类、共划分成14个森林类型。为便于日常径流观测,以主要公路干线为纽带,在每个森林类型中各选林班1个,设置20m×5m观测样地、其中5m边平行于等高线。包括退耕还林样地 No.5,灌木林样地 No.2,针叶林样地 No.3 和 No.4,针阔混交林样地 No.6、No.8、No.9、No.13,常

表1 不同林分类型的物种多样性指数<sup>[13]</sup>

Table 1 Biodiversity index of different layers in different forest types

样地 Plot no.	乔木层 Tree layer			灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer		
	Gleason Index	Simpson Index	Pielou Index	Gleason Index	Simpson Index	Pielou Index	Gleason Index	Simpson Index	Pielou Index
1	0.869	0.536	0.639	3.338	0.152	0.844	7.282	0.233	0.781
2				2.731	0.267	0.771	10.013	0.145	0.872
3	0.434	0.755	0.592	4.855	0.332	0.892	5.461	0.230	0.887
4	0.217	1.000		2.124	7.177	0.770	5.461	0.271	0.804
5							10.013	0.154	0.847
6	0.651	0.584	0.622	4.551	3.214	0.492	10.923	0.174	0.822
7	0.434	0.510	1.421	5.158	4.360	0.271	8.192	0.346	0.666
8	0.434	0.680	0.722	4.551	0.738	0.672	10.923	0.176	0.828
9	0.869	0.398	0.796	3.034	0.033	0.464	12.743	0.369	0.551
10	2.389	0.122	0.928	6.068	0.393	1.020	7.282	0.315	0.689
11	1.954	0.193	0.850	6.675	0.062	0.855	7.282	0.244	0.765
12	0.869	0.313	0.906	4.248	0.069	0.615	10.923	0.174	0.801
13	1.520	0.257	0.842	4.551	0.036	0.575	7.282	0.642	0.358
14	0.869	0.306	0.921	2.427	0.863	0.647	0.910	1.000	0.000

表2 不同林分类型的林分主要特征

Table 2 Biomass and coverage of different layers in different forest types

样地 Plot no.	生物量 Biomass (t hm <sup>-2</sup> )				盖度 Coverage (%)		
	乔木层 Tree layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	枯落物层 Litter layer	乔木层 Tree layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer
1	9.178	1.859	0.655	2.833	70.00	40.00	37.00
2		2.232	0.410	2.833		56.00	55.00
3	6.681	3.050	0.123	8.500	45.00	50.00	23.00
4	0.003	8.416	0.369	0.833	40.00	63.00	65.00
5			0.184	0.000			45.00
6	3.304	6.387	0.532	3.000	50.00	48.00	35.00
7	7.127	4.582	0.614	8.000	60.00	28.00	35.00
8	16.180	2.204	0.184	9.833	90.00	28.00	17.00
9	20.926	0.669	0.410	9.667	60.00	7.00	33.00
10	6.941	2.503	0.082	7.333	60.00	58.00	10.00
11	8.817	1.480	0.532	6.833	40.00	43.00	43.00
12	3.275	1.103	0.983	5.500	30.00	16.00	88.00
13	7.787	0.963	52.162	3.333	30.00	12.00	78.00
14	1.926	3.423	1.515	10.667	5.00	55.00	68.00

绿落叶阔叶林样地 No.1、No.7、N.10、No.11、No.12、No.14。不同林分类型的主要物种组成和层片特征差异明显(表 1-2)。

退耕还林地幼树包括香椿(*Toona sinensis*)、柳杉(*Cryptomeria japonica*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)，草本层有马耳朵(*Oplismenus compositus*)、筒轴茅(*Rotthoellia exaltata*)、地瓜(*Ficus tikoua*)、茅草(*Poa* sp.)等，地上部分生物量为  $0.184 \text{ t hm}^{-2}$ 、草本层盖度为 45%；灌木林地灌木层有铁扫帚(*Lespedeza cuneate*)、胡颓子(*Elaeagnus pungens*)、蔷薇(*Rosa multiflora*)、红棘(*Pyracantha fortuneana*)、女贞、月月青(*Itea ilicifolia*)、马桑(*Coriaria sinica*)、花椒(*Zanthoxylum esquirolii*)等，草本层有蕨(*Woodwardia unigemmata*)、地瓜、茅草、筒轴茅、马耳朵等，地上部分生物量为  $5.475 \text{ t hm}^{-2}$ 、灌木层盖度为 56%、草本层盖度为 55%；针叶林地乔木层有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏木(*Cupressus funebris*)，灌木层有马桑、蔷薇、杨(*Populus adenopoda*)、珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*)、白栎(*Quercus fabri*)、马尾松、波缘山矾(*Symplocos sinuata*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、柏木、胡颓子、女贞、棕(*Rhapis excelsa*)、杉木等，草本层有茅草、地瓜、马耳朵、筒轴茅等，地上部分生物量为  $9.621-18.354 \text{ t hm}^{-2}$ 、平均  $13.988 \text{ t hm}^{-2}$ ，乔木层盖度为 40%-45%、灌木层盖度为 50%-63%、草本层盖度为 23%-65%；针阔混交林地乔木层有柏木、马尾松、化香(*Platycarya strobilacea*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、杨、桦(*Betula luminifera*)、刺老包(*Aralia elata*)、鼠李(*Rhamnus esquirolii*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、山胡椒(*Lindera glauca*)等，灌木层有蔷薇、山矾、珊瑚树、柏木、马尾松、红椴(*Desmodium sequax*)、白栎、茅栗(*Castanea sequinii*)、枫香、花椒、木姜子(*Litsea pungens*)、构树、刺老包、珍珠菜(*Viburnum foetidum* var. *ceanothoides*)等，草本层有蓼衣草、地瓜、筒轴茅、车前草(*Plantago asiatica*)、茅草、蕨等，地上部分生物量为  $13.223-64.245 \text{ t hm}^{-2}$ 、平均  $34.385 \text{ t hm}^{-2}$ ，乔木层盖度为 30%-90%、灌木层盖度为 7%-48%、草本层盖度为 17%-78%；常绿落叶阔叶混交林地乔木层有枫香、杨、青冈、化香、漆树(*Toxicodendron vericifluum*)、盐肤木、木姜子、榆(*Ulmus changii* var. *kunmingensis*)、香叶树(*Lindera communis*)、桦、刺老包、油桐、乌柏(*Sapium*

*sebiferum*)、鼠李等，灌木层有化香、山矾、女贞、鼠李、红棘、花椒、杨、水竹(*Phyllostachys heteroclada*)、灯台(*Cornus controversa*)、铁扫帚、盐肤木、算盘子(*Glochidion puberum*)、四照花(*Dendrobenthamia japonica* var. *chinensis*)、杜鹃(*Rhododendron simsii*)、柃木(*Eurya kweichouensis*)等，草本层有筒轴茅、马耳朵、地瓜、过路黄(*Lysimachia christinae*)等，地上部分生物量为  $10.86-20.32 \text{ t hm}^{-2}$ 、平均  $16.294 \text{ t hm}^{-2}$ ，乔木层盖度为 5%-70%、灌木层盖度为 16%-58%、草本层盖度为 10%-88%。

在观测样地的上、左、右边界向外开挖宽 10-15 cm，深 30 cm 的沟，沟内用混凝土铸基，挡水墙用砖石修建，露出地表高度 15-20 cm，斜面向外。下边挡水墙内侧设有集水槽，槽长 500 cm，宽 15-20 cm，中部深 20 cm，集水槽垂直断面为一等腰三角形，槽内水向中部聚流，中部向外设有直径 8-10 cm 的出水孔。坡面径流经出水孔流入盛水池，盛水池尺寸为  $80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ，盛水池旁有同体积备用池相连、防特大降雨时盛水池溢水。盛水池用砖砌，水泥砂浆涂面，内置水位尺。为防止暴雨时径流场上方和两侧的地表流渗入径流场内，在径流场两侧和上方开挖排水沟进行保护，上方排水沟距挡水墙 100 cm、两侧排水沟距挡水墙 50 cm，其宽 20 cm，深 15 cm 左右。不同林分类型的径流场为单坡面，分布在海拔 1 018-1 285 m，坡度变幅  $13^{\circ}-42^{\circ}$ ，位于香火岩复合喀斯特峡谷东北向。

## 2.2 样地调查

2001、2005 年分别对 14 个观测样地进行乔木层调查。同时，每个样地内设  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  灌木样地、 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  草本和枯落物样地各 3 个。乔木层和灌木层按物种测定胸(地)径和高度、用模型推算生物量<sup>[9-10]</sup>；草本层统计每种株数和平均高度、用收获法测定生物量；枯落物按收集量称重。样地内设置 3 个土壤剖面，调查土层厚度、石砾量、根量；分层取样分析容重、最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度和总孔隙度，相关指标分析见《森林土壤分析方法》<sup>[11]</sup>。统计分析时使用 2 个调查年数据的平均值。

## 2.3 雨量点设置和观测

在试验区所在峡谷的东北坡向，分中、下部各设置雨量点 1 个，常年观测记录气温、降雨量等气象因素变化过程。雨量点设置和观测按《地面气象

观测规范》<sup>[12]</sup>执行。

## 2.4 地表径流指标测定

在降雨时段,分别在雨日及雨后 8:00、20:00 时观测记录盛水池水位,每次记录完后移走盛水池积水。

径流深度(mm)= $0.064 h \times \cos \alpha$  其中, $\alpha$  为坡度; $h$  为水位尺读数(cm)。

径流系数(%)=径流深度/降雨量 $\times 100$ 。

变动系数(%)= $S/X \times 100$  其中, $S$  为观测值标准差; $X$  为观测值平均值。

## 2.5 数据处理

SPSS 软件处理相关数据。

# 3 结果和分析

## 3.1 地表径流特征及径流量的年际变化

不同林分类型年平均径流量为 11.108 mm、变幅为 1.765–22.934 mm (表 3)。根据植被生活型归类,退耕还林幼林地的年均径流量为 22.934 mm,灌木林地 1.765 mm,针叶林地 17.236 mm,针阔混交林地 10.770 mm,阔叶林地 8.876 mm。不同林分类型径流量的季节变化趋势为夏季>春

季>秋季>冬季,月平均径流量为 0.926 mm、变幅为 0.162–4.751 mm,月平均径流量变动系数为 79.44%、变幅为 67.39%–97.81%。

不同林分类型地表径流累计值的月变化符合“慢—快—慢”的 Logistic 增长过程,相关性均达极显著水平(表 4,图 1)。不同林分类型年径流量变化规律为退耕还林幼林>针叶林>针阔混交林>阔叶林,与同生物气候带内的地带性森林、不同生物气候带的其它森林类型的地表径流量变化规律相似<sup>[14]</sup>。其中灌木林地地表径流量较小的原因与砂质白云岩成土的土层薄、石砾量高,渗透性强有关。

不同林分类型月径流系数平均值为 0.82%、变幅为 0.51%–2.08%;季径流系数平均值为 2.47%、变幅为 1.73%–3.64%;年径流系数平均值为 9.89%、变幅为 1.96%–21.37%(表 5)。退耕还林幼林地径流系数季节变化为夏季>春季>秋季>冬季,针叶林和针阔混交林地的季节变化为夏季>春季>冬季>秋季,灌木林和阔叶林地的季节变化为春季>夏季>冬季>秋季。

不同林分类型(表 6)年际间平均径流量为 11.108 mm、变幅为 10.553–11.699 mm。径流量的年际变动系数同地表植被覆盖的复杂程度无明显相关性,平均值为 24.93%、变幅为 5.22%–73.33%;径

表 3 不同林分类型径流量月动态(mm)

Table 3 Month dynamics of surface runoff (mm) in different forest types

样地 Plot no.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
1	0.159	0.103	0.151	0.462	1.062	0.792	2.009	0.763	0.307	0.313	0.161	0.141
2	0.027	0.035	0.086	0.284	0.458	0.117	0.331	0.266	0.078	0.026	0.013	0.044
3	0.377	0.283	0.340	0.893	2.666	1.300	6.092	1.419	0.578	0.679	0.327	0.340
4	0.740	0.344	0.517	1.334	3.447	2.038	4.678	3.191	1.076	0.918	0.451	0.445
5	0.018	0.000	0.052	0.232	3.539	2.303	15.470	1.236	0.049	0.010	0.025	0.000
6	0.066	0.069	0.069	0.208	0.714	0.388	3.617	0.309	0.107	0.072	0.079	0.048
7	0.129	0.133	0.211	0.517	1.458	0.913	5.137	0.878	0.316	0.413	0.227	0.146
8	0.117	0.114	0.167	0.539	1.070	0.771	8.425	0.738	0.271	0.275	0.104	0.121
9	0.133	0.340	0.230	2.419	1.776	0.979	8.270	1.344	0.279	0.453	0.211	0.245
10	0.137	0.095	0.112	0.364	1.009	0.441	0.887	0.453	0.145	0.173	0.117	0.079
11	0.168	0.124	0.227	0.549	1.390	0.588	1.368	0.485	0.195	0.217	0.122	0.134
12	0.542	0.319	0.531	1.194	5.799	1.966	4.942	1.973	0.709	1.027	0.379	0.326
13	0.084	0.084	0.095	0.399	2.298	0.609	3.180	0.546	0.234	0.294	0.056	0.063
14	0.277	0.225	0.200	0.522	1.687	0.670	2.101	0.552	0.259	0.256	0.153	0.170
①	0.212	0.162	0.213	0.708	2.027	0.991	4.751	1.011	0.329	0.366	0.173	0.164
②	97.81	72.18	71.55	84.40	71.10	67.39	83.99	78.67	85.50	85.23	76.60	78.86

①地表径流量平均值 Average value of surface runoff; ②变动系数 Variance coefficient (%)

表 4 不同林分类型地表径流的 Logistic 模型系数  
Table 4 Logistic model coefficients of soil surface runoff in different forest types

模型系数 Model coefficients	退耕还林幼林 Young forest returned farmland	灌木林 Shrub forest	针叶林 Coniferous forest	针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	阔叶林 Broad-leaved forest
R	0.9036***	0.8824***	0.9376***	0.9198***	0.9229***
A	1227.3187	30.2656	26.9955	66.4819	28.8831
B	0.476872	0.700361	0.717266	0.649331	0.709408

Logistic 曲线:  $y=1/(1+a*b^m)$ ,  $y$  为地表径流量、 $m$  为月份。  $R_{(0.05,10)}=0.576$ ;  $R_{(0.01,10)}=0.708$ ;  $R_{(0.001,10)}=0.822$ 。

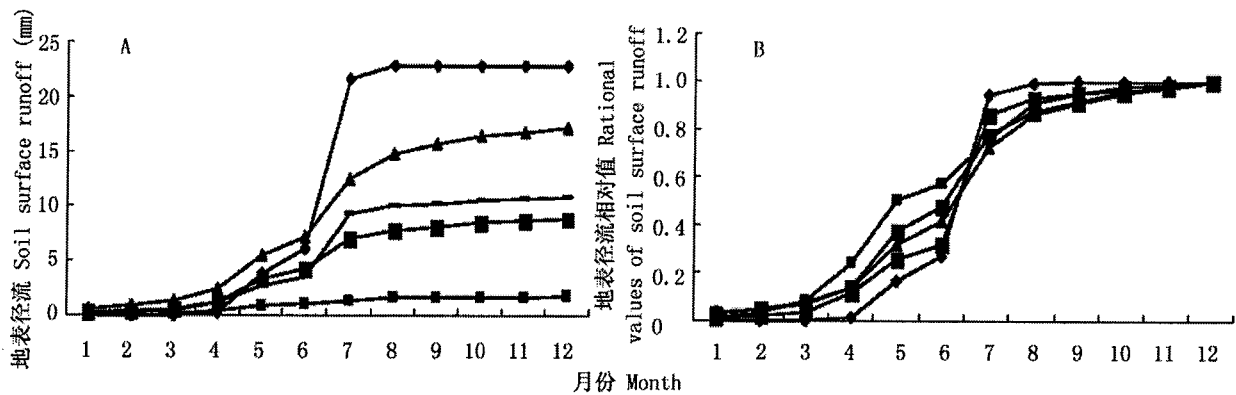


图 1 不同林分类型地表径流累计绝对值(A)和相对值(B)月变化

Fig. 1 Month dynamics of total values (A) and rational values (B) of soil surface runoff in different forest types

◆: 退耕还林幼林 Young forest returned farmland; ■: 灌木林 Shrub forest; ▲: 针叶林 Coniferous forest; ●: 针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest; ▣: 阔叶林 Broad-leaved forest.

表 5 不同林分类型径流系数月动态变化(%)  
Table 5 Month dynamics of soil surface runoff coefficient in different forest types

	退耕还林幼林 Young forest returned farmland	灌木林 Shrub forest	针叶林 Coniferous forest	针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	阔叶林 Broad-leaved forest
Jan.	0.056	0.083	1.701	0.305	0.717
Feb.	0.000	0.114	1.018	0.492	0.541
Mar.	0.167	0.278	1.383	0.453	0.771
Apr.	0.329	0.404	1.585	1.269	0.856
May	1.880	0.243	1.624	0.778	1.098
Jun.	1.658	0.084	1.202	0.495	0.644
Jul.	6.771	0.145	2.357	2.571	1.200
Aug.	1.030	0.221	1.920	0.612	0.708
Sep.	0.094	0.150	1.587	0.427	0.617
Oct.	0.014	0.037	1.121	0.384	0.562
Nov.	0.083	0.044	1.307	0.378	0.649
Dec.	0.000	0.155	1.378	0.419	0.583

表 6 不同林分类型地表径流量的年际变化

Table 6 Annual variation of soil surface runoff in different forest types

样地 Plot no.	年 Year			平均值 (mm) Average	标准差 (mm) Standard deviation	变动系数 (%) Variance coefficient
	2003	2004	2005			
1	6.035	5.639	7.593	6.422	1.033	16.09
2	1.742	1.687	1.867	1.765	0.092	5.22
3	18.860	14.382	12.639	15.293	3.209	20.98
4	14.265	22.375	20.894	19.178	4.319	22.52
5	20.176	25.100	23.526	22.934	2.515	10.97
6	10.555	2.713	3.967	5.745	4.213	73.33
7	7.163	7.430	16.840	10.477	5.511	52.60
8	13.165	11.847	13.129	12.714	0.750	5.90
9	18.192	22.106	9.733	16.677	6.324	37.92
10	3.790	4.133	4.112	4.012	0.192	4.80
11	5.934	5.378	5.392	5.568	0.317	5.69
12	15.230	25.305	18.588	19.708	5.130	26.03
13	12.325	8.511	2.991	7.943	4.693	59.09
14	7.574	7.175	6.465	7.071	0.561	7.94

流量的年际变动系数平均值小于不同林分类型在月份上的差异,变幅大于不同林分类型在月份上的差异。主要受大地形上的局地小气候、地貌和林分特征的综合影响。如同坡向峡谷中部年降雨量为 1 033.729 mm、蒸发量为 685.762 mm;峡谷底部的相应值为 983.512 mm、1 143.969 mm。年际间降雨量的变幅为 901.719-1 154.250 mm、变动系数为 13.09%。

### 3.2 地表径流的影响因素

地表径流受多种因素影响,这种影响一般用单因素、多因素的相关性检验与多元回归方程来模拟<sup>[14]</sup>。定义为影响因子对地表径流的贡献率(bi):

$$bi=100 \cdot Bi / \sum_{i=1}^I |Bi| \quad \text{其中, } Bi, bi \text{ 分别为因子 } i$$

的回归系数、贡献率;I为影响因子数。

#### 3.2.1 气象要素

##### 3.2.1.1 水分

旬地表径流量同相对湿度(X<sub>1</sub>)、降雨量(X<sub>2</sub>)、蒸发量(X<sub>3</sub>)的单相关性和复相关性均达极显著水平(表 7),回归式为  $Y=1.314-0.017X_1+0.017X_2-0.002X_3$ 。其中降雨量和相对湿度的贡献率较大、数值相近、极性相反,蒸发量的贡献率较小。其中相对湿度的增大一般是在雨中和雨后,对地表径流量的贡献率为负;蒸发量大则径流量少,其贡献率为负;地表径流量随降雨量的增大而增加,贡献率为正。逐步回归分析表明:旬地表径流量同降雨量的相关性显著:  $Y=-0.163+0.017X_2$ 。

##### 3.2.1.2 温度

旬地表径流量同温度的各项指标的单相关性和复相关性均达显著水平(表 8)。多元回归的因子贡献率中,绝对值前三位的排序为旬最低气温>旬

表 7 水分的相关指标对地表径流的相关性和贡献率

Table 7 Correlation and contribution ratio of relative hydrological factors to surface runoff in different forest types

	相对湿度 Relative humidity	降雨量 Precipitation	蒸发量 Evaporation
单相关系数 Correlation coefficient*	0.305**	0.815***	0.234*
贡献率 Contribution ratio (%)	-47.22	47.22	-5.56

\*R<sub>0.05,97</sub>=0.195、R<sub>0.01,97</sub>=0.254、R<sub>0.001,97</sub>=0.321。复相关系数为 0.822\*\*\*, Multi-correlation coefficient is 0.822\*\*\*。

表 8 旬温度的相关指标对地表径流的相关性和贡献率

Table 8 Correlation and contribution ratio of relative temperature factors to surface runoff in different forest types

	空气温度 Air temperature			地表温度 Surface temperature			土壤温度 Soil temperature			
	平均 Average	最高 Max.	最低 Min.	平均 Average	最高 Max.	最低 Min.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
单相关系数 Correlation coefficient*	0.361	0.347	0.384	0.344	0.230	0.383	0.346	0.349	0.351	0.349
贡献率 Contribution ratio (%)	-18.93	10.54	21.43	7.26	-1.02	3.17	-14.06	-12.93	7.82	2.83

\*同表 7。复相关系数为 0.449\*\*\*, Multi-correlation coefficient is 0.449\*\*\*.

平均气温 > 5 cm 地温, 最低气温和旬平均气温的贡献率为正, 5 cm 地温为负。逐步回归分析表明: 旬地表径流量与最低气温 ( $X_4$ ) 的相关性显著:  $Y = -0.143 + 0.040X_4$ 。这与气温对地表径流量影响的间接性有关。

### 3.2.1.3 气象要素综合分析

旬地表径流量与相对湿度、降雨量、蒸发量、最低气温、平均气温 ( $X_5$ ) 和 5 cm 地温 ( $X_6$ ) 的复相关系数为 0.827\*\*\*, 达极显著水平, 回归式为:  $Y = -0.0189 - 0.0016X_1 + 0.0186X_2 - 0.0031X_3 - 0.0224X_4 + 0.0243X_5 - 0.0224X_6$ 。因子贡献率分别为 -2.01%、23.39%、-3.84%、-28.08%、30.55%、12.13%, 绝对值前三位的排序为平均气温 > 最低气温 > 降雨量, 平均气温和降雨量的贡献率为正、最低气温为负, 反映了温度对近地气流的控制作用、进而影响降水与森林的地表径流量。

## 3.2.2 林分特征

### 3.2.2.1 层片结构

年地表径流量与不同林分类型乔木层高度 ( $X_1$ )、乔木层株数 ( $X_2$ )、灌木层高度 ( $X_3$ )、灌木层株数 ( $X_4$ )、草本层高度 ( $X_5$ ) 和草本层株数 ( $X_6$ ) 的单相关性不显著、复相关性达显著水平。因子贡献率绝对值排序为灌木层高度 > 乔木层高度 > 草本层高度 > 乔木层株数 > 灌木层株数 > 草本层株数。表明植被层不同层次平均高度对地表径流量的影响较大, 其

次是不同层次的密度。较高的灌木层和草本层有利于减少地表径流量, 较大的乔木层密度也有利于减少地表径流量; 较高的乔木层高度预示群落发育程度高, 受人为干扰的可能性增大、对林下植物生长的抑制作用增强, 地表径流量增加。

### 3.2.2.2 层片生物量

年地表径流量与不同林分类型乔木层生物量 ( $X_7$ ,  $R_7=0.006$ )、灌木层生物量 ( $X_8$ ,  $R_8=-0.060$ )、草本层生物量 ( $X_9$ ,  $R_9=-0.141$ ) 和枯落物量 ( $X_{10}$ ,  $R_{10}=-0.141$ ) 的单相关性和复相关性不显著。地表径流量有随乔木层生物量增加而增大, 随灌木层、草本层和枯落物层生物量增加而减小的趋势。表明森林内部不同层次生物量结构对径流量的影响具有互补性, 较高的乔木层生物量积累抑制了灌木层和草本层的发育, 增加了林地径流量; 合理的乔、灌、草层生物量结构有利于减少地表径流量。

### 3.2.2.3 层片盖度

年地表径流量与不同林分类型乔木层盖度 ( $X_{11}$ ,  $R_{11}=-0.064$ )、灌木层盖度 ( $X_{12}$ ,  $R_{12}=-0.532^*$ )、草本层盖度 ( $X_{13}$ ,  $R_{13}=0.198$ ) 的复相关系数为 0.642\*、相关性达显著水平, 回归式为:  $Y = 15.394 + 0.002X_{11} - 0.0164X_{12} + 0.034X_{13}$ 。因子贡献率分别为 3.82%、-31.30%、64.89%, 绝对值排序为草本层盖度 > 灌木层盖度 > 乔木层盖度, 其中乔木层和草本层盖度贡献率为正、灌木层为负。逐步回归分析表明年地表

表 9 层片结构指标对年地表径流量的相关性和贡献率

Table 9 Correlation and contribution ratio of layers structure index to annual surface runoff of different forest types

	乔木层 Tree layer		灌木层 Shrub layer		草本层 Herb layer	
	高度 Height	密度 Density	高度 Height	密度 Density	高度 Height	密度 Density
单相关系数 Correlation coefficient*	0.162	-0.373	-0.338	-0.127	-0.185	-0.013
贡献率 Contribution ratio (%)	17.40	-0.81	-79.09	0.00	-2.71	0.00

\* $R_{0.05,12}=0.531$ 、 $R_{0.01,12}=0.661$ 、 $R_{0.001,12}=0.780$ 。复相关系数为 0.737\*, Multi-correlation coefficient is 0.737\*.



表 10 多样性指数对年地表径流量的相关性和贡献率

Table 10 Correlation and contribution ratio of biodiversity index to annual surface runoff of different forest types

	乔木层 Tree layer			灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer		
	Gleason Index	Simpson Index	Pielou Index	Gleason Index	Simpson Index	Pielou Index	Gleason Index	Simpson Index	Pielou Index
单相关系数 Correlation coefficient*	-0.147	0.114	0.029	-0.320	0.034	-0.463	0.133	0.079	-0.110
贡献率 Contribution ratio (%)	-0.29	6.66	12.46	0.72	-5.61	-32.14	-0.03	19.66	22.45

\*同表 9。复相关系数为 0.896\*, Multi-correlation coefficient is 0.896\*。

径流量与灌木层盖度 ( $X_{12}$ ) 的相关性显著:  $Y = 54.444 - 1.6605X_{12}$ 。表明提高灌木层盖度有利于减少地表径流量, 较高的草本层盖度预示乔木和灌木层植物稀疏, 地表径流量增大。

3.2.2.4 生物多样性

年地表径流量与不同林分类型乔木层、灌木层和草本层的 Gleason 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数的单相关性不显著、复相关性显著 (表 10)。Gleason 指数在乔木层和草本层对地表径流量的贡献率为负、在灌木层为正; Simpson 和 Pielou 指数在乔木层和草本层对地表径流量的贡献率为正、在灌木层为负。多样性指数贡献率绝对值前三位的排序为灌木层 Pielou 指数 > 草本层 Pielou 指数 > 草本层 Simpson 指数。逐步回归分析表明年地表径流量同灌木层的 Pielou 指数 ( $X_{14}$ ) 相关性显著:  $Y = 15.720 - 8.788X_{14}$ , 较高的灌木层均匀度有利于减少地表径流量。

3.2.2.5 林分特征综合分析

除生物量外, 根据因子贡献率排序, 选择每类因子前三位构成林分综合特征指标, 分析年地表径流量与不同林分类型乔木层、灌木层、草本层的高度、盖度和总生物量 ( $X_0$ ), 以及灌木层和草本层 ( $X_{15}$ ) 的 Pielou 指数、草本层的 Simpson 指数 ( $X_{16}$ ) 的相关性, 复相关系数为 0.960\*。  $Y = -46.0576 + 2.2517X_1 -$

$15.7707X_3 - 0.0963X_5 - 0.0664X_0 - 0.0233X_{11} - 0.1508X_{12} + 0.2959X_{13} + 4.1066X_{14} + 56.8588X_{15} + 76.7202X_{16}$ 。因子贡献率分别为 1.44%、-10.09%、-0.06%、-0.04%、-0.01%、-0.10%、0.19%、2.63%、36.37%、49.07%, 绝对值前五位的排序为草本层 Simpson 指数 ( $X_{16}$ ) > 草本层 Pielou 指数 ( $X_{15}$ ) > 灌木层高度 ( $X_3$ ) > 灌木层 Pielou 指数 ( $X_{14}$ ) > 乔木层高度 ( $X_1$ )。草本层 Simpson 指数和 Pielou 指数的贡献率达 85.44%。森林群落内部, 乔木层高度对地表径流量的贡献率为正、灌木层和草本层高度的贡献率为负, 乔木层和灌木层盖度对地表径流量的贡献率为负、草本层为正, 植被层生物量对地表径流量的贡献率为负, 表明森林不同层片对地表径流量的影响具有互补性和抑制性, 受森林群落组成、结构和发育程度的共同影响。

3.2.3 立地因素

在不同林分类型年地表径流量与土壤 A 层主要特性指标的相关性中 (表 11), 与毛管孔隙度和总孔隙度的相关性显著, 同相关指标的复相关性达显著水平, 年地表径流量随坡度、根量和最大持水量的增大而增加, 随海拔高度、土层厚度、石砾含量、容重、毛管持水量和孔隙度的增加而降低。因子贡献率中, 容重为 -96.54%、石砾含量为 -1.26%。逐步回归分析表明不同林分类型年地表径流量与表层

表 11 表土特征对地表径流的相关性和贡献率

Table 11 Correlation and contribution ratio of surface soil stratum to surface runoff of different forest types

	坡度 Slope	海拔 Altitude	土厚 Soil depth	石砾 Gravel contents	根量 Root contents	容重 Volume weight	最大持水量 Max. water retain capacity	毛管持水量 Capillary water retain capacity	毛管孔隙度 Capillary pore	总孔隙度 Total porosity
单相关系数 Correlation coefficient*	0.431	-0.183	0.431	-0.351	-0.424	-0.048	0.032	-0.163	-0.697	-0.663
贡献率 Contribution ratio (%)	0.35	-0.04	-0.18	-1.26	0.84	-96.54	0.07	-0.18	-0.28	-0.25

\*同表 9。复相关系数为 0.959\*, Multi-correlation coefficient is 0.959\*。

土壤毛管孔隙度( $X_{17}$ )的相关性显著: $Y=24.668-0.102X_{17}$ 。因此,有利于提高土壤总孔隙度和毛管孔隙度、降低容重的营林措施均能减少地表径流量。

## 4 结论和建议

### 4.1 主要结论

黔中喀斯特山地不同林分类型年地表径流量均值为 11.108 mm、林分类型间变幅为 1.765–22.934 mm、年际间变幅为 10.553–11.699 mm,退耕还林幼林(22.934 mm) > 针叶林(17.236 mm) > 针阔混交林(10.770 mm) > 阔叶林(8.876 mm)。不同森林类型年地表径流量的季节变化为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,同降雨量的季节变化趋势相一致。与同生物气候带、不同生物气候带森林相近类型的径流量规律相似,反映出黔中喀斯特山地森林与其它森林地表径流量规律的相似性。其中喀斯特山地森林中灌木林地地表径流量与其它地带性和非地带性森林中灌木林地地表径流量变化的相异性又反映出黔中喀斯特山地森林径流的特殊性,这种特殊性主要是成土母岩造成的。灌木林所在地的白云岩成土浅薄、石砾量高,母岩裂隙众多,降雨主要以壤中流进入地下,地表径流量较小。

地表径流系数的季节变化趋势中,退耕还林幼林为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,针叶和针阔混交林为夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季,灌木林和阔叶林为春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季,这种差异与不同林分类型组成树种的生活型有关。灌木林和阔叶林主要以落叶树种为主,到夏季才能形成丰厚的冠层截持降雨,地表径流量减小、径流系数较小;同样由于秋季的落叶、导致有林地枯落物层增厚,地表径流量增大,造成秋、冬季径流系数变化在有林地和幼林地间的相异性。

年地表径流量的年际变动系数小于林分类型间的变动系数,月径流量在不同林分类型间的变动系数均值大于年际间变动系数均值,变幅小于年际间变动系数变幅,主要受大气环流、局地小气候、地貌和林分特征的综合影响。

旬地表径流量同反映温度和水分的气象指标的单相关性达显著水平,多元回归方程模拟发现衡量温度的相关指标对地表径流量的贡献率高于降水,这反映了温度对近地气团的控制作用,进而影响区域降水和林地径流量。

年地表径流量同林分特征中的高度、密度、盖度、生物量和多样性指数的单相关性不显著,复相关性显著。综合分析发现森林不同层片特征对地表径流量的影响具有互补性和抑制性,受森林群落组成、结构和发育的共同影响,地表径流量大小是不同森林群落生态功能的体现。影响不同森林类型地表径流量的群落特征因素中,乔木层、灌木层和草本层高度对年径流量的贡献率大于密度,径流量随乔木层生物量的增大而增加,随灌木层和草本层和枯落物层生物量的增大而减少,盖度对径流量的贡献率变化趋势为灌木层 > 草本层 > 乔木层,相关多样性指数对径流量贡献率的变化趋势为草本层 > 灌木层 > 乔木层。

年地表径流量受小生境特性和林地表层土壤的综合影响。地表径流量随坡度的增大而增加,随海拔的升高而降低,同毛管孔隙度和总孔隙度的负相关性达显著水平。多元回归方程模拟发现容重的贡献率达 -96.54%。

### 4.2 建议

不同森林类型年径流量的变化规律为退耕还林幼林 > 针叶林 > 针阔混交林 > 阔叶林,占降雨量比例的变幅为 0.86%–2.22%。不同森林类型覆盖有效地降低了地表径流,控制了喀斯特山地的水土流失。因此,采用植被恢复手段治理水土流失和石漠化是喀斯特山地行之有效的途径,其中阔叶林类型的效果较好。

森林群落组成、结构对地表径流量的影响具有相互补充性和抑制性,科学、合理地调整森林结构能有效地降低地表径流。因此,完整的森林层片结构、良好发育的灌木层和草本层、适当蓄留的枯物层均有利于降低地表径流,可通过物种多样性控制、群落层片保育和密度调控达到目的。

林地表层土壤特性直接影响地表径流量的大小,其径流量大小与表层土壤总孔隙度、毛管孔隙度的负相关性达显著水平,土壤容重对径流量的贡献率达 -96.54%。可通过蓄留枯落物,提高表层土壤生物活性,增加孔隙度,减小地表径流。

黔中山地鱼梁河流域内高原剥夷面和峡谷并存,残丘溶原、峰林盆地,河谷穿行其间,形成大的峡谷坡向、坡度内若干小的坡向、坡度,构成喀斯特山地坡向和坡度的“多层组合”型,这是常态地貌上不俱备的,直接影响研究森林对地表径流作用的

精度。本研究是通过加大观测样地数量来克服坡向、坡度的影响,其研究结果反映了喀斯特山地森林对地表径流影响规律的一般性和特异性。研究中,使用观测当年退耕还林地幼林作参照系,分析不同植被覆盖对径流的影响,由于退耕地和耕地的地表特性有差异,特别是退耕还林后草本层的迅速恢复,影响了参照系的质量,但作为无林地参照仍是有效的。不同森林类型降低地表径流作用的基本规律未变。由于喀斯特山地地质地貌的复杂性,有必要深入研究森林对地表径流的影响。

### 参考文献

- [1] Yu X X(余新晓), Zhang Z Q(张志强), Cheng L H(陈丽华), et al. Forest Ecological Hydrology [M]. Beijing: China Forestry Press, 2004:11.(in Chinese)
- [2] Liu S R(刘世荣), Wen Y G(温远光), Wang B(王兵), et al. Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China [M]. Beijing: China Forestry Press, 1996:7.(in Chinese)
- [3] Bonell M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forest [J]. *J Hydrol*, 1993, 150:217-275.
- [4] Mei Z M(梅再美), Xiong K N(熊康宁). A study on the dynamic characteristics of soil erosion and ecobenefit evaluation in karst region—A case on Qingzhen demonstrating site of returning farmland to wood (grass), Guizhou [J]. *Carsol Sin(中国岩溶)*, 2003, 22(2):136-143.(in Chinese)
- [5] Dunne T. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff [J]. *Water Resour Res*, 1991, 27(9):2271-2285.
- [6] Peters D L. Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian Shield basin [J]. *Water Resour Res*, 1995, 31(5):1291-1304.
- [7] Zhou Z X(周政贤). Forest in Guizhou Province [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1992:1-113.(in Chinese)
- [8] Jiang Z C(蒋忠诚), Yuan D X(袁道先). Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources [J]. *Acta Geosic Sin(地球学报)*, 1999, 20(3):302-308.(in Chinese)
- [9] Yu L F(喻理飞), Zhu S Q(朱守谦), Ye J Z(叶镜中), et al. Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration [J]. *Sci Silv Sin(林业科学)*, 2002, 38(1):1-7.(in Chinese)
- [10] Feng Z W(冯宗炜), Wang X K(王效科), Wu G(吴刚), et al. Biomass and Productivity of Forest Ecosystem in China [M]. Beijing: Science Press, 1999:3. (in Chinese)
- [11] State Forest Administration of China (国家林业局). Forest Soil Analysis Methods — Forestry Professional Standards of P. R. China, LY/T 1210-1275 [M]. Beijing: China Standards Press, 1999:22-25, 54-57.(in Chinese)
- [12] State Weather Administration of China(中央气象局). Ground Meteorological Observation Standards [M]. Beijing: China Weather Press, 1979:12.(in Chinese)
- [13] Zhang J T(张金屯). Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004:7.(in Chinese)
- [14] Tang S Z(唐守正). Polythetic Statistical Analysis [M]. Beijing: China Forestry Press, 1986:10.(in Chinese)