

# 云南石林典型植被类型的降水垂直分配及 水平汇聚规律观测研究

丁文荣, 李玉辉, 曾学梅, 何文静  
(云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 变化环境下的水资源管理及植被恢复是岩溶区亟待解决的现实问题。以云南石林岩溶区典型植被类型为对象, 设置实验样地并开展了2018-2019年两个雨季的野外观测, 分别对不同植被类型的降雨分配及汇聚规律进行了探索。结果表明: 石林地区受到亚洲季风的控制, 降水量的年内变化具有显著的季风区特征, 即高度集中于雨季, 特别是5-8月, 降雨类型以小雨和中雨占主导, 两者在全年降水场次中的比例分别为70%、15%; 各实验观测植被类型的穿透雨量、树干径流量以及截留量均随着林外降雨量的增加而增大, 降雨量的分配特征为降雨量 > 穿透雨量 > 截留量 > 树干径流量; 各植被类型的径流系数差别明显, 变化范围为0.01%~0.36%, 石漠化裸地区径流系数最大而坡耕地最小, 但整体来看都非常小; 产流的降雨量阈值差别较大, 其范围为2.0~6.4 mm, 随着林外降雨量的增多, 各观测样地的地表产流量也呈现增大的态势。本观测研究结果可以为岩溶区水资源管理与生态环境恢复保育提供科学依据。

**关键词:** 岩溶区; 植被类型; 植被截留; 坡面产流; 云南石林

中图分类号: TV121.1; S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)01-0022-06

## Vertical distribution and horizontal convergence of precipitation in typical vegetation types of Shilin County, Yunnan Province

DING Wenrong, LI Yuhui, ZENG Xuemei, HE Wenjing

(Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The management of water resources and vegetation restoration under the changing environment is a practical problem needing urgent attention in karst areas. Taking the typical vegetation types in the karst area of Shilin County, Yunnan Province as the research object, experimental plots were set up and field observations were carried out in the two rainy seasons of 2018-2019. The rainfall distribution and convergence laws of different vegetation types were explored respectively. The results show that Shilin area was controlled by the Asian monsoon, and the annual variation of precipitation presented significant monsoon characteristics. The precipitation mainly concentrated in the rainy season, especially from May to August, dominated by light rain and moderate rain, with the proportion of 70% and 15% respectively in the annual precipitation events. The throughfall of canopy layer, stem flow and interception of different vegetation types all increased with the increase of the rainfall outside of the forest, and the distribution of rainfall was outside rainfall > throughfall > interception > stem flow. The runoff coefficients of different vegetation types varied greatly, the range of variation was 0.01% - 0.36%, with that of rocky desertification bare area being the largest and that of slope farmland being the smallest, but on the whole, the values are all meagre. The threshold range of runoff was 2.0 - 6.4 mm, with the increase of outside rainfall, the surface runoff of all plots also showed an increasing trend. The results can provide scientific basis for the management of water resources as well as the restoration and conservation of ecological environ-

收稿日期: 2020-05-17; 修回日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761105)

作者简介: 丁文荣(1979-), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水文与水资源方面的研究工作。

ment in karst areas.

**Key words:** karst area; vegetation type; vegetation interception; slope runoff; Shilin County of Yunnan Province

## 1 研究背景

退化岩溶区的水资源、水环境问题是区域可持续发展的严重制约因素,中国西南岩溶区尤为突出,是水文地质研究中亟需突破的难点问题<sup>[1-2]</sup>。特殊的岩溶环境下,森林系统的水源涵养功能主要表现为垂直含水结构层存储降水以及水平分布格局对水分的集聚作用,植被系统-土壤结构发育良好的岩溶生态结构具有水源自我调节功能<sup>[3-4]</sup>。国内外诸多研究个例均表明,植被系统对岩溶区水循环的影响表现在使降水不易产生坡面径流,进而增加入渗补给量,在有植被覆盖的岩溶区,可以显著减少地表总体产流量<sup>[5-11]</sup>,而且森林植被对岩溶区降水的调节功能与植被类型、演替阶段和群落结构有关,成熟的原生林(地带性植被群落)强于次生林,石漠化地区植被群落的调节能力最弱<sup>[12-14]</sup>。

石林彝族自治县是滇中地区石漠化最为严重的区域,县内岩溶土地覆盖面积高达 1 027.4 km<sup>2</sup>,占国土面积的 59.8%,其中石漠化土地面积为 483.57 km<sup>2</sup>,达岩溶土地面积的 47.06%<sup>[15]</sup>。前期在石林景区开展的研究表明,植被恢复时其土壤水文结构功能随着封禁年限的增加而提升<sup>[16]</sup>。然而,从降水到径流形成这一完整过程的规律依然不明晰,极大地制约了滇中岩溶区水源地建设与植被保育工程的推进。鉴于此,本研究以云南石林岩溶区典型植被类型,即原生林、次生林、云南松林、坡耕地、石灰岩裸地以及石灰岩灌丛 6 种植被类型为对象,设置了相应的观测样地,并开展了 2018-2019 年为期两个雨季的实验观测,分别对不同植被类型的降雨分配及汇聚规律进行了探索,结果可以为滇中岩溶区水资源管理与生态环境恢复保育提供科学依据。

## 2 实验观测与研究方法

### 2.1 研究区概况及样地设置

石林彝族自治县位于昆明市东南部,属滇中高原岩溶区,地层以碳酸岩类为主,地形起伏和缓,切割轻微,高程在 1 700~1 950 m 之间。境内盆地、低山、洼地、石丘、石牙及峰丛等岩溶地貌类型齐全,地势东高西低,由东北向西南倾斜。石林县处于典型的北亚热带季风气候区,气温的年较差小,多年平均气温为 16.4℃,年均降水量为 949.5 mm,干季、湿季极为分

明,季风期降水量占全年降水量的 85%,非季风期降水量不足全年降水量的 15%,超过 10℃ 的年活动积温为 4 715.13℃,平均风速为 2.1 m/s。

依据石林岩溶区现状土地利用方式和典型植被序列,在石林世界自然遗产地核心区及缓冲区,分别选择原生林、次生林、坡耕地、石灰岩裸地、云南松林和石灰岩灌丛 6 种当地代表性植被类型,建立了对应的观测样地和降水自动观测站,其分布见图 1。

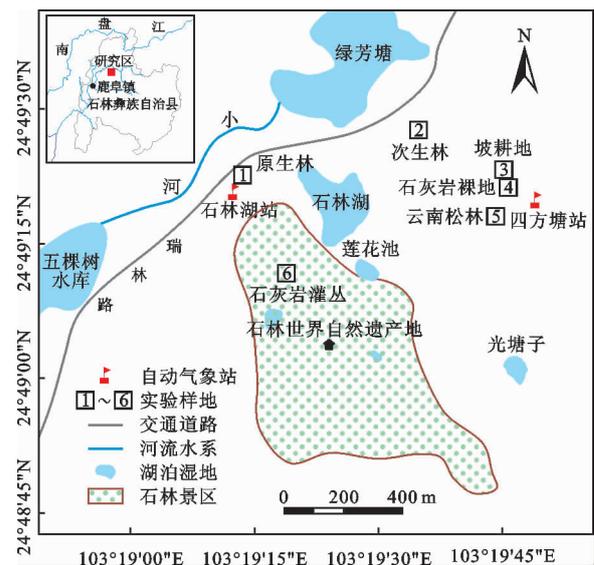


图 1 观测样地及降水自动观测站分布

实验观测样地分布在海拔 1 743~1 772 m 之间,样地内平均基岩裸露率为 35%。土壤由石灰岩发育而成,相应的土层深度为 20~50 cm,主要类型为红色石灰土和山原红壤,质地为黏土和黏壤土,粉粒、黏粒质量分数为 25%~50%,土壤 pH 值为中性至微碱性。

### 2.2 观测与计算方法

(1)降雨:采用 Vantage Pro 2 型自记录气象站进行降雨量观测,该型号自动站的雨测量采用翻斗式工作原理,分辨率为 0.2 mm。本研究分别在石林世界自然遗产地北部石林湖、东部四方塘各安置 1 套观测站,两站间直线距离为 1.03 km(图 1)。其中石林湖站的降水数据用于原生林、石灰岩灌丛样地的分析,四方塘站的降水数据用于云南松林、坡耕地、石灰岩裸地及次生林样地的分析。

(2)穿透雨:分别在原生林、次生林以及云南松林 3 个样地内,布设规格为长 400 cm、宽 20 cm、深

20 cm 的自制承雨槽,两段承雨槽依据坡度进行拼接,底部用钢筋支架进行固定。承雨槽的出水口处放置 50 L 的集水桶,作为收集穿透雨的装置。每次降雨结束后,立即用量筒测定各样地内集水桶中穿透雨的体积,并换算成雨深,换算公式为:

$$T_F = (T \times 1000) / A \quad (1)$$

式中: $T_F$  为林内穿透降雨量,mm;  $T$  为集水桶内的雨水体积,mL;  $A$  为承雨槽受雨面积,mm<sup>2</sup>。

(3) 树干径流:依据树种和胸径大小,分别在原生林、栓皮栎次生林以及云南松林样地内各选择 5 棵典型树来测定树干径流。具体为在距离地面 1.5 m 的高度处,将剖开的 PVC 软管呈螺旋状缠绕在树干上,固定后用防水胶将树干与塑料软管间的缝隙密封,同时在软管基部连接一个容积为 15 L 的集水桶以收集树干径流。每次降雨结束后,立即用量筒测定各集水桶内树干径流的体积,并换算成样地树干径流深,计算公式为:

$$S_F = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot M_i}{S_p \times 1000} \quad (2)$$

式中: $S_F$  为样地树干径流深,mm;  $n$  为树干径级数;

$C_i$  为径级  $i$  的树干径流量,mL,  $M_i$  为径级  $i$  的树木株数;  $S_p$  为样地面积,m<sup>2</sup>。

(4) 坡面产流:分别在 6 个观测样地内建立了对应的径流小区,各观测样地径流小区特征值见表 1。径流小区外围用 15 ~ 30 cm 高的隔水层围住,防止小区内水的流失及小区外水的流入。然后在径流小区的下游出水口处设置尺寸为 1.0 m × 1.0 m × 1.0 m (长 × 宽 × 高) 的集流池,每次降雨事件后观测集流池内的产流情况,有产流时将其取出测量,无产流时也做记录,测量时记录时间及天气状况,以保证测量数据的时效性。

### 3 结果与分析

#### 3.1 降水特征

石林处于亚洲季风区,降水的年内变化具有季风区的显著特征<sup>[17]</sup>。2018 年石林湖站和四方塘站降水量分别为 834、907.6 mm,2019 年则分别为 929.2、1 004.4 mm,其中 2018 年属于平水年而 2019 年属于丰水年。2018 - 2019 年研究区的降水量年内分布及雨型特征见图 2。

表 1 各观测样地径流小区特征值

试验样地	投影面积/m <sup>2</sup>	海拔/m	坡度/(°)	坡位	坡向	植被类型
原生林	329.6	1772	10 ~ 15	中上部	E	北亚热带顶级植被群落
次生林	236.0	1767	16 ~ 22	中部	SE	栓皮栎,封禁自然恢复
坡耕地	265.4	1743	24 ~ 29	中部	SW	旱作耕地,冬季撂荒
石灰岩裸地	312.6	1750	20 ~ 26	中部	SW	封禁,秋冬季除草
云南松林	590.0	1768	24 ~ 35	中下部	N	飞播云南松,30 a 林龄
石灰岩灌丛	822.0	1752	4 ~ 13	中部	SW	5 a 自然恢复柏树

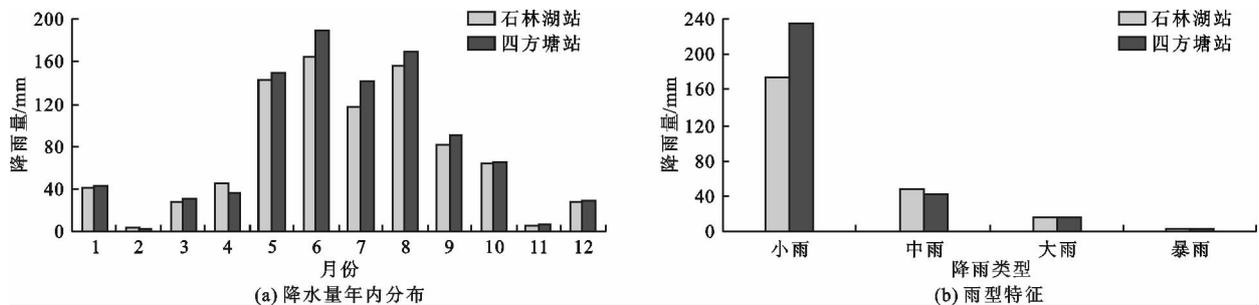


图 2 2018 - 2019 年研究区的降水量年内分布及雨型特征

由图 2(a) 可以看出,研究区降雨主要发生在季风期即湿季,特别是 5 - 8 月的降水量占全年的 68%。2018 - 2019 年石林湖站、四方塘站的降水日数分别为 238、296 d。由图 2(b) 的统计结果可见,

降雨类型中的小雨和中雨占主导地位,石林湖站小雨、中雨、大雨和暴雨降雨量的比例分别为 73.11%、19.75%、6.30% 和 0.84%,四方塘站则分别为 79.05%、14.53%、5.74% 和 0.68%。

### 3.2 垂直分配

植被(森林)对降水的垂直分配过程主要指森林水分输入过程,森林生态系统结构复杂,致使雨水需经过林冠层截留、树干径流、地表枯落物吸水等多种形式的分配后才能到达地表,进而成为森林土壤的水分来源。考虑到植被条件,本研究于 2018-2019 年两个雨季分别对原生密枝林、栓皮栎次生林、云南松林的降水垂直分配即穿透雨、树干径流开展了观测,并对资料完整性最好的 52 d 的降水分配数据进行了统计(不连续)。该 52 d 中石林湖自动雨量站降雨量为 304.4 mm(雨日为 37 d),无雨、小雨、中雨、大雨、暴雨降雨量的天数分别为 15、23、7、6、1 d,四方塘站测得降雨量为 319.6 mm(雨日为 41 d),无雨、小雨、中雨、大雨、暴雨降雨量的天数分别为 11、26、8、5、2 d,涵盖了研究区所有的降水过程类型。雨日中各植被类型的降水分配特征如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,在石林湖区样地的 37 个雨日中,原生植被类型密枝林产生穿透雨、树干径流的日数分别为 27、23 d,林冠穿透雨量达 225.25 mm,树干径流量为 0.58 mm。四方塘区样地的 41 个雨日中,栓皮栎次生林产生穿透雨、树干径流的日数为 27、

24 d,穿透雨量和树干径流量分别为 239.85 和 1.37 mm,而云南松林穿透雨、树干径流的日数为 27 和 15 d,穿透雨量和树干径流量则分别有 233.47 和 0.12 mm。就不同植被类型产生穿透雨和树干径流的降雨量阈值来看,原生林、次生林、云南松林的穿透雨阈值均较低,分别为 1.0、1.4 和 1.4 mm,而发生树干径流的林外降雨量阈值则较高,云南松林甚至需要 6.4 mm 的降水才会产生明显可测的树干径流。

表 2 研究区样地 3 种植被类型的降雨垂直分配特征

植被类型	垂直分配	产生次数	观测值/mm	降雨量阈值/mm
原生林	穿透雨	27	225.25	1.0
	树干径流	23	0.58	4.0
次生林	穿透雨	27	239.85	1.4
	树干径流	24	1.37	1.4
云南松林	穿透雨	27	233.47	1.4
	树干径流	15	0.12	6.4

上述 3 种植被类型的穿透雨量与林外降雨量的关系见图 3;树干径流量与林外降雨量的关系见图 4。

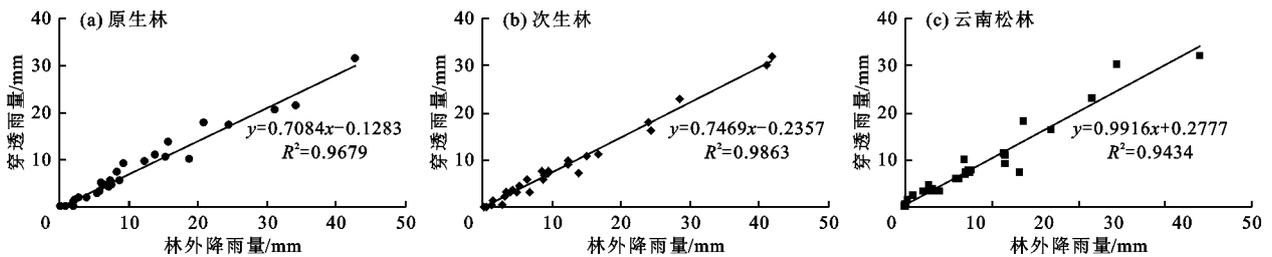


图 3 研究区样地 3 种植被类型的穿透雨量与林外降雨量关系

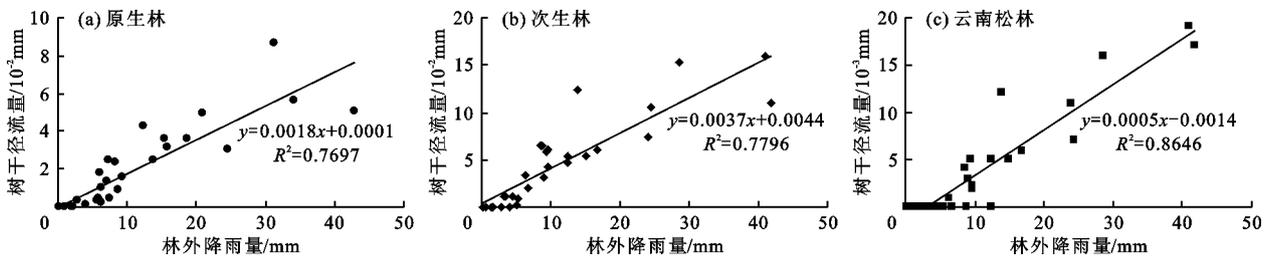


图 4 研究区样地 3 种植被类型的树干径流量与林外降雨量关系

由图 3 可看出, 3 种植被类型的林冠穿透雨量与林外降雨量之间均表现出显著的正相关关系, 确定系数  $R^2$  均超过了 0.90, 其中栓皮栎次生林  $R^2 = 0.9863$ , 为最大, 而云南松林  $R^2 = 0.9434$ , 为最小。由图 4 可见, 树干径流量与林外降雨量之间同样存在明显的正相关关系, 确定系数  $R^2$  均大于 0.76, 其

中云南松林区相关性最强, 而原生林区最弱。

林外降水与到达林下的降水(穿透雨、树干径流)之差为植被的截留, 是土壤侵蚀与水土保持研究的重要指标, 通过计算得知: 原生林、次生林、云南松林的截留率分别为 25.81%、24.52% 和 26.91%, 其中云南松林截留最多而栓皮栎次生林则最少。图

5 为石林湖区样地 3 种植被类型的植被截留量与林外降雨量关系,由图 5 也可以看出植被截留量与降水量变化相关,随着林外降水量的不断增加,植被截留量亦呈现出增加的趋势,符合森林生态水文过程的普遍规律<sup>[18]</sup>。

总体来看,研究区样地森林植被中次生林的降雨穿透率最高,云南松林次之,原生林最小;树干径流率次生林最高,原生林次之,云南松林最低,不同树种的树干径流量有所差异;截留率与穿透率变化

规律相反。降雨的垂直分配规律为:林外的降雨量 > 穿透雨量 > 林冠截留量 > 树干径流量。

### 3.3 水平汇聚

水平汇聚是植被水平分布格局(植物群落、面积、位置)对聚集降水、增加产流等环节的影响,即植被对地表径流的影响。通过截留后到达地表的降雨将发生水平产流作用,是直接水资源形成的重要环节。本次 6 个样地不同植被类型的产流状况与垂直降水同步观测,结果见图 6 和表 3。

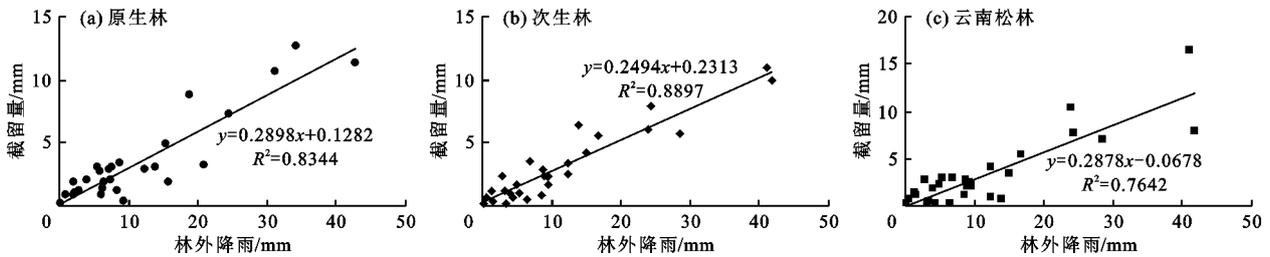


图 5 研究区样地 3 种植被类型的植被截留量与林外降雨量关系

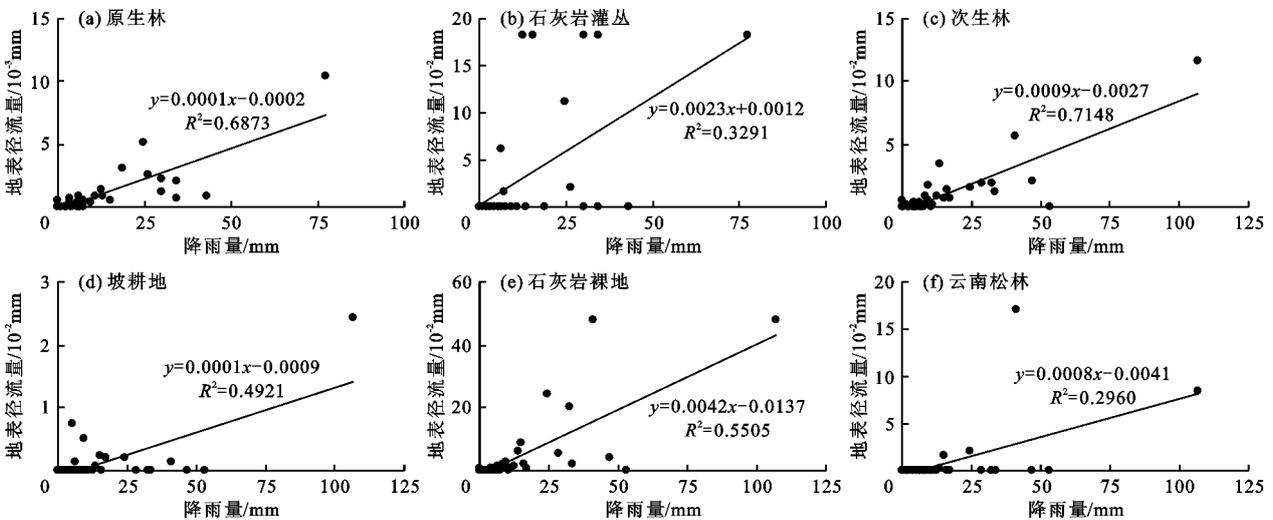


图 6 研究区样地 6 种不同植被类型的降雨量与地表径流量关系

表 3 研究区样地 6 种不同植被类型的降雨水平汇聚特征

植被类型	降雨量 均值/mm	产流次数	产流量/ mm	降雨量 阈值/mm	径流系数 极大值/%	径流系数 极小值/%	径流系数/ %
原生林	9.41	26	0.06	2.0	0.22	0	0.02
石灰岩灌丛	9.41	13	1.10	6.0	1.47	0	0.36
次生林	11.07	34	0.21	2.8	0.25	0	0.07
坡耕地	11.07	10	0.01	6.2	0.07	0	0.01
石灰岩裸地	11.07	33	1.08	2.8	1.17	0	0.34
云南松林	11.07	6	0.22	6.4	0.41	0	0.06

注:原生林、石灰岩灌丛采用的是石林湖站的降水数据;次生林、坡耕地、石灰岩裸地和云南松林采用的四方塘站的降水数据。

由图 6 可以看出,各观测样地的降雨量与地表径流量之间均表现为正相关关系,其中次生林的确

定系数  $R^2$  达 0.7148,而云南松林仅为 0.2960。然而,6 组观测样地的降雨量与产流量之间的相关关

系,均未达到 0.05 的置信水平。

表 3 中的特征值表明,各种植被类型的降水水平汇聚特征存在明显差别。在石林湖区样地的 37 d 雨日中,降雨量为 304.4 mm,原生林、石灰岩灌丛各产流 26 和 13 次,产流量分别为 0.06、1.10 mm,而在四方塘区样地的 41 d 雨日中,降雨量为 319.6 mm,次生林、坡耕地、石灰岩裸地、云南松林产流次数分别为 34、10、33 和 6 次,产流量则分别为 0.21、0.01、1.08 和 0.21 mm;各植被类型的地面径流系数也存在显著的差异,其中石灰岩灌丛区的径流系数最大,为 0.36%,而坡耕地仅有 0.01%,但整体来看地面径流系数都非常小。

就各植被类型的总产流量来看,无林区表现为石灰岩灌丛最多,裸地次之,耕地最少,有林区表现为云南松林 > 次生林 > 原生林;从产流的降雨量阈值来看,6 种植被类型差别较大,其中原生林区 2.0 mm 的降水量即可产流,而云南松林则需要 6.4 mm 才会产流,两者相差 3.2 倍;随着林外降雨量的增加,各样地的地表产流量也表现出增大的态势。可以看出,各观测植被类型的地面产流规律差别明显,整体表现为森林植被对地表径流的调节作用明显,无林区产流量大于有林区。

## 4 讨 论

对于植被的降水垂直分配,国外亚热带常绿阔叶林区的冠层截留率在 11% ~ 36% 范围之内变化,亚寒带针叶林的截留率则在 9% ~ 48% 之间<sup>[19]</sup>。我国气候类型多样,不同类型森林植被林冠层的截留率存在明显的差别<sup>[18]</sup>。本研究结果中原生植被密枝林、次生林、云南松林的截留率分别为 25.81%、24.52% 和 26.91%,符合预期。

源于地质条件的独特性,岩溶区坡面产流系数往往非常小<sup>[20]</sup>,在贵州普定、关岭等小流域对坡耕地、灌草地、复合植被等 6 种植被类型的观测结果也表明,地表产流非常少,径流系数在 0.01% ~ 12.85% 之间<sup>[4,9,11]</sup>。广西北部峰丛地区在不同类型的水文年份,各植被区地面径流系数均小于 5%,林内的降雨主要入渗补给土壤水或地下水<sup>[5,7,10]</sup>。本次在云南滇中的观测亦表明,典型植被类型的径流系数在 0.01% ~ 0.36% 之间,与贵州、广西的同类成果一致,表明观测结果是可靠的。

## 5 结 论

为揭示滇中地区主要植被类型的降水分配过程

及汇聚规律,本研究于 2018 - 2019 年在云南石林开展了为期两个雨季的观测,得出以下结论:

(1) 云南石林地区受到亚洲季风的控制,降水的年内变化具有季风区的显著特征,即高度集中在季风期特别是 5 - 8 月,研究区降雨类型以小雨和中雨为主,两者在全年降水场次中的比例分别为 70% 和 15%。

(2) 各植被类型的穿透雨量、树干径流量以及截留量均伴随林外降雨量的增加而增大,降水分配的总体特征为林外降雨量 > 穿透雨量 > 林冠截留量 > 树干径流量。

(3) 各植被类型的径流系数差别明显,变化范围为 0.01% ~ 0.36%,岩溶石漠化裸地区径流系数最大而坡耕地最小,但整体来看都非常小;各植被类型产流的降雨量阈值差别明显,范围为 2.0 ~ 6.4 mm,伴随林外降雨量的增多,各观测样地的地表产流量也呈现出增大的态势。

## 参考文献:

- [1] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98 - 100.
- [2] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7432 - 7440.
- [3] 周秋文, 罗雅雪, 罗 娅, 等. 喀斯特灌木林枯落物持水特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 14 - 20.
- [4] 罗雅雪, 张思琪, 颜 红, 等. 亚喀斯特林地野外模拟降雨条件下地表径流特征[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 117 - 121.
- [5] 朱晓锋, 陈洪松, 付智勇, 等. 喀斯特灌丛坡地土壤 - 表层岩溶带产流及氮素流失特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2197 - 2206.
- [6] 戴明宏, 张军以, 王腊春, 等. 岩溶地区土地利用/覆被变化的水文效应研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(3): 189 - 196.
- [7] 杨 青, 杨广斌, 赵青松, 等. 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 9 - 16.
- [8] 李衍青, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 植被恢复对岩溶石漠化区土壤有机碳及轻组有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 158 - 163.
- [9] 杜 波, 唐丽霞, 潘佑静, 等. 喀斯特小流域坡面与流域降雨产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 1 - 6.
- [10] 陈洪松, 杨 静, 傅 伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 121 - 126.

(下转第 35 页)

- [3] 乌日娜. 对自然资源部履行全民所有自然资源资产所有者职责的工作范围和对象的理解[J]. 西部资源, 2020(1): 192-193.
- [4] 水利部, 国土资源部. 水利部 国土资源部关于印发《水流产权确权试点方案》的通知[EB/OL]. (2016-11-04) [2020-04-24]. [http://www.waterinfo.com.cn/special/219/251/255/201611/t20161109\\_6580.html](http://www.waterinfo.com.cn/special/219/251/255/201611/t20161109_6580.html).
- [5] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于统筹推进自然资源资产产权制度改革的指导意见[EB/OL]. (2019-04-14) [2020-07-26]. [http://www.gov.cn/zhengce/2019-04/14/content\\_5382818.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2019-04/14/content_5382818.htm).
- [6] 杨曦. 审批视角下的分级代理行使自然资源所有权研究[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2019, 40(1): 89-97.
- [7] 陈建明, 周校培, 袁汝华, 等. 水资源资产管理体制研究[J]. 水利经济, 2016, 34(5): 18-22+80.
- [8] 刘定湘, 罗琳, 严婷婷. 水资源国家所有权的实现路径及推进对策[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 39-43.
- [9] 陈静, 陈丽萍, 郭志京. 自然资源资产国家所有权实现方式探讨[J]. 中国土地, 2020(1): 20-23.
- [10] 马永欢, 吴初国, 林慧, 等. 完善全民所有自然资源资产管理体制研究[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(1): 60-70.
- [11] 吴强, 陈金木. 健全水资源资产管理体制的思考与建议[J]. 人民黄河, 2017, 39(10): 47-50+54.
- [12] 曹璐, 陈健, 刘小勇. 我国水资源资产管理制度建设的探讨[J]. 人民长江, 2016, 47(8): 113-116.
- [13] 国务院. 国务院关于全民所有自然资源资产有偿使用制度改革的指导意见[EB/OL]. (2017-01-16) [2020-08-02]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/16/content\\_5160287.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/16/content_5160287.htm).
- [14] 王晓娟, 李晶, 陈金木, 等. 健全水资源资产产权制度的思考[J]. 水利经济, 2016, 34(1): 19-22+27+83.
- [15] 王喜峰. 基于二元水循环理论的水资源资产化管理框架构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(1): 83-88.
- [16] 马永欢, 吴初国, 黄宝荣, 等. 构建全民所有自然资源资产管理体制新格局[J]. 中国软科学, 2018(11): 10-16.
- [17] BISWAS A K. Water for sustainable development in the 21st century[J]. Water International, 1991, 16(4): 219-224.
- [18] Australian Bureau of Statistics. Australian system of government finance statistics: Concepts, sources and methods[EB/OL]. (2015-12-23) [2020-08-05]. <http://www.abs.gov.au/AUSSTATS/abs@.nsf/allprimarymainfeature>.
- [19] 常纪文. 国有自然资源资产管理体制改革的建议与思考[J]. 中国环境管理, 2019, 11(1): 11-22.
- [20] 水利部. 取水许可和水资源费征收管理条例[EB/OL]. (2017-03-22) [2020-08-11]. [http://www.mwr.gov.cn/zw/zcfg/xzfgfxwj/201707/t20170713\\_955721.html](http://www.mwr.gov.cn/zw/zcfg/xzfgfxwj/201707/t20170713_955721.html).
- [21] 王建平, 李发鹏, 夏朋. 两手发力——要充分发挥好市场配置资源的作用和更好发挥政府作用[J]. 水利发展研究, 2018, 18(9): 33-41.
- [22] 黄晓荣, 郭碧莹, 奚圆圆, 等. 水资源资产负债表编制理论与方法研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 1-5.
- [23] 柴雪蕊, 黄晓荣, 奚圆圆, 等. 浅析水资源资产负债表的编制[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 44-49.

(上接第 27 页)

- [11] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 125-129.
- [12] PENG Tao, WANG Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90: 53-62.
- [13] 王明明, 王世杰, 白晓永, 等. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6083-6097.
- [14] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1674-1686.
- [15] 马红梅, 储小院, 赵建明. 石林彝族自治县石漠化现状及治理对策探讨[J]. 林业建设, 2016(2): 18-21.
- [16] 张勇, 王晶晶, 李玉辉. 云南石林景区恢复植被的土壤水文结构功能研究[J]. 中国岩溶, 2009, 28(3): 293-299.
- [17] 陈宗瑜. 云南气候总论[M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [18] 余新晓. 中国典型区域森林生态水文过程与机制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [19] HÖRMANN G, BRANDING A, CLEMEN T, et al. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in southern German[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 79(3): 131-148.
- [20] 高渐飞, 杨振华, 苏维词, 等. 喀斯特坡面径流集蓄利用研究现状与展望[J]. 节水灌溉, 2019(9): 97-99+104.