

邓 艳, 蒋忠诚, 徐 焯, 等. 典型表层岩溶泉域植被对降雨的再分配研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 714-721.
DOI: 10. 11932/karst20180509

典型表层岩溶泉域植被对降雨的再分配研究

邓 艳^{1,2}, 蒋忠诚², 徐 焯², 岳祥飞², 李旭尧², 梁锦桃²

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004;
3. 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘 要: 本文在表层岩溶泉域植被结构特征分析的基础上, 监测桂林丫吉试验场 S31 号泉域内香椿和云实两种主要植被的穿透雨和树干径流特征以及钻孔和表层岩溶水的变化。结果表明: 香椿林的总穿透雨量 1 861.83 mm, 占总降雨总量的 59.65%; 云实灌丛总的穿透雨量为 1 626.42 mm, 占总降雨量的 52.11%; 穿透雨率随降雨量增加而减少。香椿林的树干径流总量为 89.4 mm, 占总降雨量的 2.86%; 云实灌丛的树干径流总量为 27.79 mm, 占总降雨量的 0.89%; 香椿林和云实灌丛的林冠截留总量分别为 1 169.97 mm 和 1 466.99 mm, 平均截留率为 37.48% 和 47.01%; 用水量平衡法计算得出以灌丛覆盖为主的 S31 号表层岩溶泉域年蒸散量为 1 623.81 mm, 占降水量的 52.03%, 年径流深度为 1 497.39 mm, 占降水量的 47.97%。植被冠层改变了降雨对表层岩溶带的补给形式和补给量。降雨经过植被冠层的截留后转化成穿透雨和树干径流进入表层岩溶带, 穿透雨以连续波状的形式补给表层岩溶带, 而树干径流则以快速集中的方式补给表层岩溶带。

关键词: 表层岩溶泉域; 林冠截留; 降雨的再分配; 水平衡

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2018)05-0714-08

0 引 言

表层岩溶带是指由于强烈的岩溶化过程, 在表层碳酸盐岩形成各种犬牙交错的岩溶个体形态和微形态并组合构成不规则带状的强岩溶化层^[1-3]。表层岩溶泉为西南岩溶山区居民历史上聚集和繁衍提供了重要的条件^[1-2]。岩溶区表层岩溶带的调蓄功能可有效控制石漠化的加剧并为严重缺水地区提供饮用水^[4]。因此, 研究表层岩溶带的调蓄功能和途径, 对解决西南岩溶区的干旱缺水问题, 促进岩溶石漠化地区的生态重建和修复具有重要的指导意义。

林冠层是植被生态系统调节大气降水再分配和水分在林内分布特征的第一个作用层, 对系统内水分循环及传输具有重要的作用。林冠对降雨的拦截作用使得降雨方式和强度、林内降雨量等发生明显地变

化, 直接决定了水分在地上和地下生态系统中的循环过程^[5-6]。降雨经过林冠后, 被分为穿透雨、树干径流和林冠截留 3 个组分。降雨在林冠再分配作用下以穿透水和树干径流的形式到达地面后, 发生第二次再分配, 其中一部分向地下渗透, 另外一部分沿地表径流。国内外许多学者对林冠的截留作用进行了大量的研究。已有研究表明, 植被林冠下穿透雨占总降雨量的比例为 69.6%~85%^[7], 树干径流的比例为 1.3%~12.3%^[8], 冠层截留率 15%~45%^[9-10]。影响林冠对降雨再分配的主要因素是树种、林分密度、冠层结构、叶面积指数、降雨强度及风速等相关因素^[11-17]。通常情况下, 穿透雨与降雨强度呈正相关关系, 树干径流与降雨强度呈负相关关系^[11], 林冠对于降雨的截留能力的大小取决于其林冠层容量的多少, 当林冠层枝叶数量越多, 且其在空间的分布越均

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0502506); 国家自然科学基金项目(41877206、41502257、41702281); 基本科研业务费专项经费(JYY-WF20182003)

第一作者简介: 邓艳(1978—), 女, 副研究员, 博士研究生, 主要从事岩溶生态水文和生态恢复研究。E-mail: dydesk@karst.ac.cn。

通信作者: 蒋忠诚(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩溶环境学研究。E-mail: zhjiang@karst.ac.cn。

收稿日期: 2018-05-12

匀,其要达到饱和时的截留容量就会越大,冠层截留能力则愈强^[18-19]。林冠能改变降雨对表层岩溶带的补给形式,且森林能在降水充沛的季节增加入渗,从而有利于增加地下水的补给量,形成地下径流^[20]。植被类型调蓄降雨的能力不同,其改变表层岩溶带水文动态的程度也不同。森林条件下的表层岩溶带的水位动态比灌木林稳定,而白云岩上发育的表层岩溶带水文动态比灰岩稳定^[21]。但前人研究主要集中在植被对降雨的截留特征上,缺乏植被截留特征对表层岩溶水的影响研究,无法准确评估植被对表层岩溶水的补给形式。因此,本文通过野外定位监测穿透雨、树干径流、钻孔和表层岩溶水等的水量变化特征,分析植被对降雨的再分配及其对表层岩溶水的影响,以揭示植被对表层岩溶水的调蓄作用,为表层岩溶泉域的生态保护和水资源综合利用提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于桂林市区的东南郊约 8 km 的丫吉村附近(图 1)(N25°10',E110°15')。在该村东南约 1 km 处是峰丛洼地与桂林峰林平原的交界地带,构成一个岩溶水文地质系统。研究区位于亚热带季风气候区,降雨季节分配不均匀,夏季盛行东亚夏季风,冬季降雨主要受内陆或局地蒸发和冬季风影响。根据桂林市气象站 1951—2012 年观测资料,该区多年平均年降雨量为 1 886 mm,蒸发量为 1 378.3 mm;雨季和旱季分明,4—8 月为雨季,其降雨量占年降雨量的 70%,从 9 月到次年 3 月为旱季,其降雨量仅为年降雨量的 30%;该区多年平均气温为 18.9℃。监测期间(2015 年 5 月至 2016 年 4 月)桂林的总降雨量为 3 121.2 mm,暴雨数量多且强度大。降水年内分配极不均匀,且雨季(4 月到 8 月)旱季(9 月到次年 3 月)不明显(图 2),11 月份的雨量明显增多。试验场内岩性单一,主要出露上泥盆统融县组(D₃r)浅灰至灰白色纯中厚层状亮晶颗粒灰岩,结构致密,孔隙度为 0.12%~3.29%,平均值为 0.68%。坡地土壤浅薄且分布不连续,厚度为 0.3~1.5 m,洼地土层较厚,一般在 1~2 m。区内岩溶发育,含水介质为裂隙—管道型^[22],其中,S31 号表层岩溶泉域为试验场最主要的子流域。示踪实验表明 S31 号泉域的补给区由 3 个小型的峰丛洼地组成,流域面积约 1 km²^[22],地下水以管道流为主,与裂隙的扩散流相组合。S31 泉对降雨反应灵敏,流量变化为 0.1~7 000 L·s⁻¹。S31 号泉流量主要来源于整个泉域岩溶裂隙水的分

散补给和洼地落水洞的集中补给,洼地内表层岩溶泉和地面径流以集中补给方式进入岩溶管道,这三部分共同组成 S31 号泉流量^[22]。水文地质调查、物探和示踪等多种方法表明 S31 号表层岩溶泉域是一个相对闭合的含水系统^[22-23],

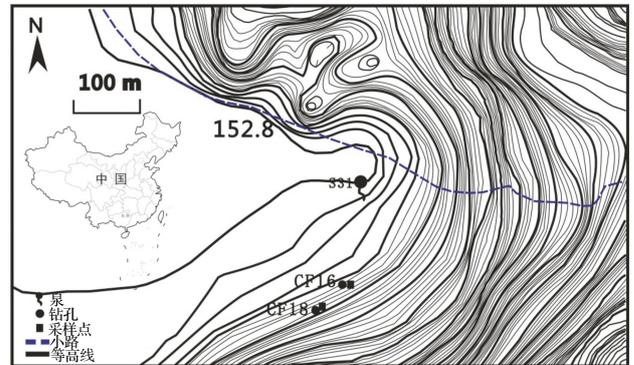


图 1 研究区位置及样地分布图

Fig. 1 Map showing location of the study area and distribution of sampling sites

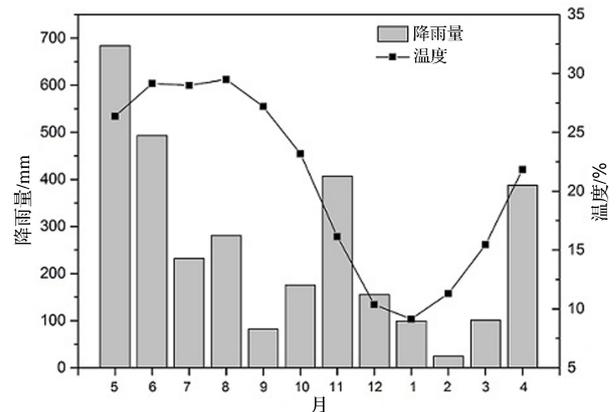


图 2 2015 年 5 月至 2016 年 4 月期间桂林月降雨量

Fig. 2 Monthly precipitation in Guilin from May 2015 to July 2016

20 世纪 80 年代以来泉域内植被遭到大量破坏,直至试验场建立后植被得以保护,目前整个场区云实(*Caesalpinia decapetala*)灌丛占 70%左右,稀疏香椿林(*Toona sinensis*)覆盖率为 30%左右。本文选择了具有代表性的香椿林样地(面积为 30 m×30 m)和云实灌丛样地(面积为 20 m×20 m,实验样地概况见表 1),及其对应的两个钻孔进行监测。两钻孔虽相隔不远,但由于岩溶区的空间异质性较高,钻孔水位相差较大。香椿林林龄约为 15 年,乔木平均胸径为 25.33 cm,乔木平均树高为 7 m,平均冠幅为 5 m。香椿人工林样地林下的灌木和草本数量较少:灌木层主要有黄荆(*Vitex negundo*)和九龙腾(*Bauhinia championii* (Benth.) Benth.)等;草本主要有肾蕨

(*Nephrolepis auriculata* (L) Trimen) 等。在云实灌丛样地中,冠层平均高度为 1.5 m,平均冠幅为 3.5 m。云实灌木层盖度为 85%,主要物种为云实、黄

荆、檣木(*Loropetalum chinensis*)等;林下的草本数量较多,草木层盖度为 30%,主要的物种有五节芒(*Miscanthus floridulus* (Labnll.) Warb)和肾蕨等。

表 1 样地基本概况

Table 1 Outline of vegetation sampling sites

样地	岩性	土壤	海拔/m	坡位	坡向	面积/hm ²	样地内钻孔编号
香椿林 (S1)	灰岩	棕色石灰土	522	中坡	SE70°	0.3	CF18
云实灌丛 (S2)	白云岩	棕色石灰土	459	中下坡	北	0.7	CF16

2 研究方法

2.1 样品采集

(1)降雨观测。实验时间为 2015 年 5 月至 2016 年 4 月,在距研究区 8 km 的桂林市开敞处放置一个标准雨量筒,对大气降雨以及其他气象因子进行连续定位监测,降雨量由 HOBO 生产的翻斗式雨量筒自动记录,测量精度为 0.2 mm,记录间隔时间为 15 min。同时布置了 3 个塑料盆用于收集林外降雨的样品。

(2)穿透雨测定。按照机械布点方法,在香椿林内分两列设置(每列 8 个,共 16 个)穿透雨收集装置。在云实灌丛下自基径处向东、南、西、北 4 个方向延伸,距离主干的辐射距离分别为 5、10、15、20 cm 处分别布置 1 个塑料桶(共计 16 个,桶的截面积为 314 cm²)。每次降雨后使用 100 mL 标准量筒测量收集到的穿透雨量(mL),穿透雨量取 16 个收集装置的均值。

(3)树干径流测定。在香椿林中选择标准木共 3 株,样株平均胸径为 25.33 cm,乔木平均树高为 7 m,平均冠幅为 5 m。将直径为 2 cm 的聚乙烯塑料管剖开,从距地面 1 m 开始蛇形缠绕树干一周半(用刀将缠绕部分的树皮稍微刮平),用图钉将塑料管固定在树干上,并用玻璃胶密封接缝处,在塑料管下端接一个 15 L 的塑料桶,每次降雨后用量筒测量桶内水量。在云实灌丛选择 2 株标准灌木,样株的平均冠幅为 3.5 m,平均树高为 1.5 m。用直径为 2 cm 的聚乙烯塑料管剖开,在灌木 10 cm 处绕着基部打成领带状,用图钉固定,并涂抹密封胶,防止雨水外泄。在塑料管下端接一个 15 L 的塑料桶,每次降雨后用量筒测量桶内水量得到树干径流量。共收集了 42 场降雨后的穿透雨和树干径流。

(4)钻孔水和表层岩溶泉水观测。在观测期间,测量穿透雨和树干径流后,使用量尺人工测量并记录

两个钻孔的水位。在 S31 号表层岩溶泉口安置了 CTD300 多参数自动记录仪(由澳大利亚 Greenspan 公司生产),自动监测泉水的水位、水温、pH 和电导率,数据采集间隔设定为 15 min。

2.2 数据分析

(1)穿透雨率($T_i, \%$) 穿透雨率为穿透雨量(T, mm)占降雨量(P, mm)的比例,计算公式: $T_i = T/P \times 100$ 。

(2)树干径流率($S_i, \%$) 树干径流率为树干径流量(S, mm)占降雨量的比例,计算公式: $S_i = S/P \times 100$ 。

(3)林冠截留量(I, mm) $I = P - T - S$, P 为林外降雨量(mm), T 为林内穿透雨量(mm)。林冠截留率($I_i, \%$)的计算公式: $I_i = I/P \times 100$ 。

(4)流域蒸散发(E, mm) 水量平衡法是计算陆面多年蒸发最基本的方法^[24-25]。在一个闭合流域内,如不考虑相邻区域的水量调入与调出,其水量平衡方程可以表示: $E = P - R \pm \Delta W$,其中, P 为流域降水量, E 为流域蒸散发量(mm), R 为流域径流量(mm), ΔW 为蓄水变量。对于年平均情况, $\Delta W \approx 0$,则 $E = P - R$ 。

3 结果和分析

3.1 植被截留特征

在观测期间,总降雨量为 3 121.2 mm,香椿林累积的穿透雨为 1 861.83 mm,占降雨总量的 59.65%,穿透雨率变幅为 29.99%~86.62%。云实灌丛总的穿透雨为 1 626.42 mm,占降雨总量的 52.11%,其穿透雨率变幅为 18.80%~97.32%。香椿林的穿透雨量与穿透雨率均高于云实灌丛(图 3),是由于云实灌丛的冠幅和叶面积指数大,冠层截留了更多的降雨。

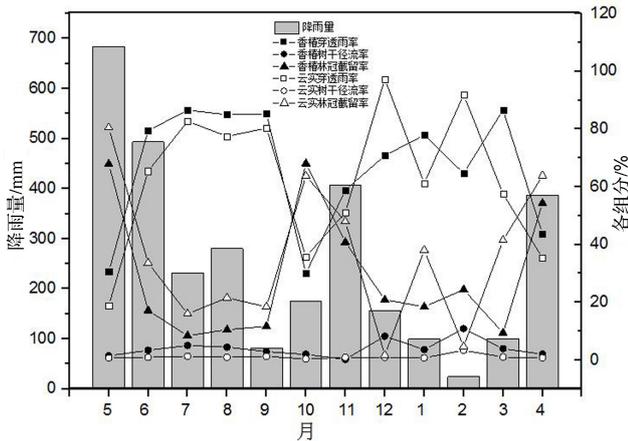


图 3 香椿林和云实灌丛林冠对大气降水截留率的月变化
Fig. 3 Monthly change of canopy interception rate to atmospheric precipitation in *Toona sinensis* and *Caesalpinia decapetala* vegetation

观测期香椿林的月树干径流量在 1.19~16.79 mm,树干径流率在 0.29%~10.90%;树干径流总量为 89.4 mm,占总降雨量的 2.86%。云实灌丛的月树干径流量在 0.76~4.81 mm,树干径流率在 0.43%~3.40%;树干径流总量为 27.79 mm,占总降雨量的 0.89%。两种林型月树干径流率相对稳定,这是由于桂林地处亚热带季风区,且观测期间总降雨量较历年平均降雨量高,雨量充沛,达到树干径流的饱和容量。树干径流除了受降雨量的影响之外,还受气候、林冠特征和树皮粗糙度等多种因素的影响。

研究期间,香椿林和云实灌丛的林冠截留总量分别为 1 169.97 mm 和 1 466.99 mm,平均截留率为 37.48% 和 47.01%,最大截留率可达 68.03% 和 80.50%。在相同林外降雨量的条件下,云实灌丛的截留量要高于香椿林,这是由于云实灌丛枝叶较茂密,郁闭度大,雨滴易被枝叶拦截,难以到达树干和地面。两种植被类型截留率相差较大,但随着降雨量的减小而减小的变化趋势基本一致,说明林冠截留不仅与植被类型密切相关,也受林外降雨特征的影响。

3.2 钻孔水位和表层岩溶泉水变化

植被冠层对降雨的截留过程改变了降雨对表层岩溶带的补给形式,可能会引起钻孔水位和表层岩溶泉水的变化。从图 4 可以看出,CF16 钻孔水位变幅为 1.94~6.77 m,平均值为 3.59 m,水位变化受大气降水影响显著,呈现暴涨暴落特征。这说明 CF16 钻孔所在区岩溶裂隙发育,入渗条件好,雨水降落到地面之后能够迅速穿过包气带进入地下,引起地下水位的波动,使钻孔水位能快速响应降雨的变化。CF18 钻孔水位变幅为 2.1~2.99 m,平均值为 2.64

m,水位变化较稳定,受降雨影响不大,主要是该样地岩溶不发育,岩溶含水介质由溶隙和溶孔等组成,连通性差。

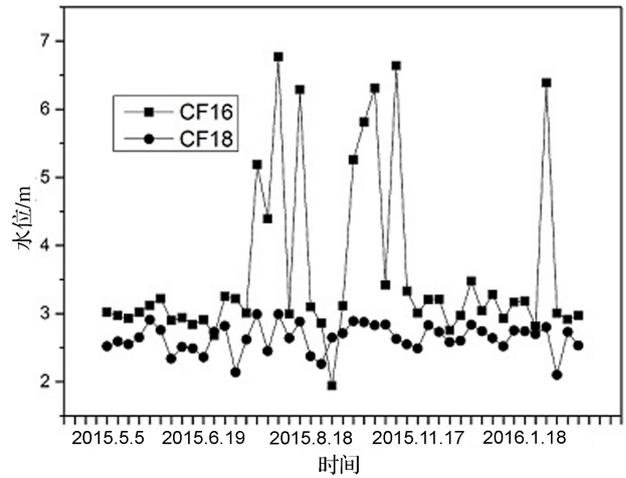


图 4 钻孔水位变化
Fig. 4 Variation of water level in borehole

降雨是 S31 号泉域的唯一补给来源,降雨通过植被的再分配,降落到地面后,通过多种途径入渗地下并经系统调蓄,通过管道径流,最终在 S31 号泉口集中排泄。S31 号泉域面积虽然较小,但由于流域内森林植被保持良好,几乎常年有流水。S31 号表层岩溶泉的汇水范围小,含水介质以管道为主,岩溶水的运动速度快。多年来,S31 号泉枯季流量约 0~2 L·s⁻¹(可出现断流),而在暴雨过后流量最大可至 2.5 m³·s⁻¹,可见泉流量受降雨分配不均的影响而变化起伏大(图 5)。在观测期间,泉水的平均流量为 25.67 L·s⁻¹,变幅为 0~164.8 L·s⁻¹。泉流量

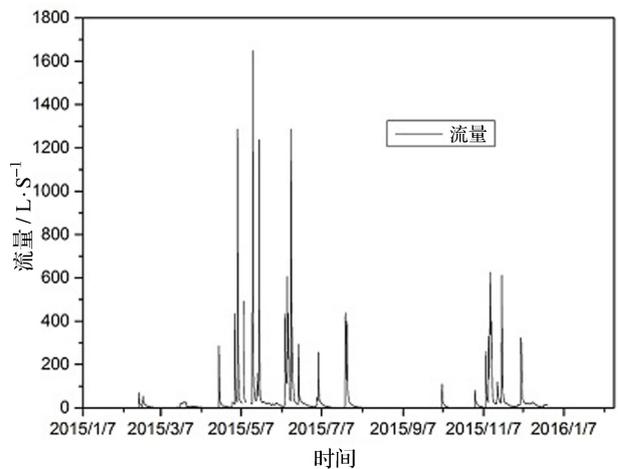


图 5 桂林丫吉试验场 S31 号表层岩溶泉流量动态变化
Fig. 5 Dynamic change of No. 31 epikarst spring flow at the Yaji test site in Guilin

的起伏变化大,除了受降雨影响外,还受岩溶含水介质结构的不均一性,岩溶管道、裂隙和孔隙并存所影响。常勇等^[22]在暴雨期间对 S31 号表层岩溶泉进行了示踪实验,示踪剂回收率为 80%,示踪剂监测时间为 3 h 32 min~7 h 39 min,平均达到时间为 4 h 31 min,根据其结果可知 S31 号表层岩溶泉在暴雨期间径流滞留时间较短。

3.3 典型表层岩溶泉域水量平衡

通常情况下,岩溶泉域是包括不同植被类型覆盖的集水区,研究流域的水量平衡需要考虑泉域内植被的种类、植被覆盖面积以及水文地质条件等。S31 号

表层岩溶泉域两种主要植被覆盖类型下的水量监测结果(表 2)显示:S31 号泉域的年穿透雨量为 1 697.04 mm,占年降雨量的 54.37%;年树干径流量为 46.27 mm,占年降雨量的 1.48%。年林冠截留量为 1 377.88 mm,占年降雨量的 44.15%。雨季(5—8 月)的林冠截留率比旱季(11 月至次年 2 月)的高 10%,主要是因为经过前期较长时间的旱季,林内树冠干燥,能更加充分地截留降雨,并且雨季气温高,日照、水分更充足,植物生长旺盛,林冠层枝繁叶茂,截留能力亦大大增强,而旱季香椿进入落叶期,林冠截留率显著下降。

表 2 桂林丫吉试验场 S31 号表层岩溶泉域降雨分配

Table 2 Precipitation redistribution of No. S31 epikarst spring catchment at Yaji site in Guilin

年.月	降雨/mm	穿透雨/mm	树干径流/mm	林冠截留/mm	径流深度/mm
2015.5	683.8	152.777	6.403	524.62	432.55
2015.6	493.4	343.550	8.348	141.502	280.49
2015.7	232	194.489	5.636	31.875	103.21
2015.8	280.4	223.497	5.688	51.215	12.10
2015.9	81.8	66.934	1.448	13.418	70.47
2015.10	175.6	59.803	1.570	114.227	14.41
2015.11	406.8	217.361	2.975	186.464	227.68
2015.12	155.6	139.064	4.896	11.640	78.78
2016.1	99.4	65.809	1.621	31.970	39.20
2016.2	24.4	20.438	1.379	2.583	18.30
2016.3	100.6	66.644	1.922	32.034	50.92
2016.4	387.4	146.677	4.387	236.336	169.28
合计	3 121.2	1 697.043	46.273	1 377.884	1 497.39

桂林丫吉试验场 S31 号泉年径流总量为 1 497.39 mm,径流系数为 0.48,径流系数变幅为 0.04~0.86。月径流量变化幅度大,其中,5—8 月份月径流系数与降雨量成正比关系(图 6),2—4 月月径流系数与降雨量呈反比关系,可能与 10—12 月较大的降雨有关。表层岩溶泉月径流量变化大与表层岩溶带内在的水文地质特点和外在的降雨分配有关。

利用水量平衡法计算出桂林丫吉试验场 S31 号表层岩溶泉域水平衡模式图(图 7)。观测期间,S31 号表层岩溶泉域有 3 121.2 mm 的降雨净输入,水量平衡中各分量分别为:蒸散发量为 1 623.81 mm,占降水量的 52.03%;年径流总量为 1 497.39 mm,占降水量的 47.97%。

地表径流占的比例较少,为 0.64%^[22]。蒸散发量是流域水分输出的主要形式,雨季 4—8 月的蒸散发率较高(59%),而旱季的蒸散发率略低(52%)。

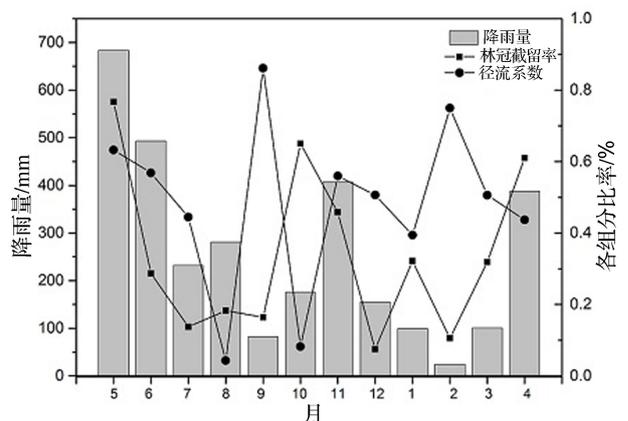


图 6 桂林丫吉试验场 S31 号表层岩溶泉域年内降水与径流分配

Fig. 6 Distribution of precipitation and runoff in No. 31 epikarst spring catchment of Yaji test site in Guilin

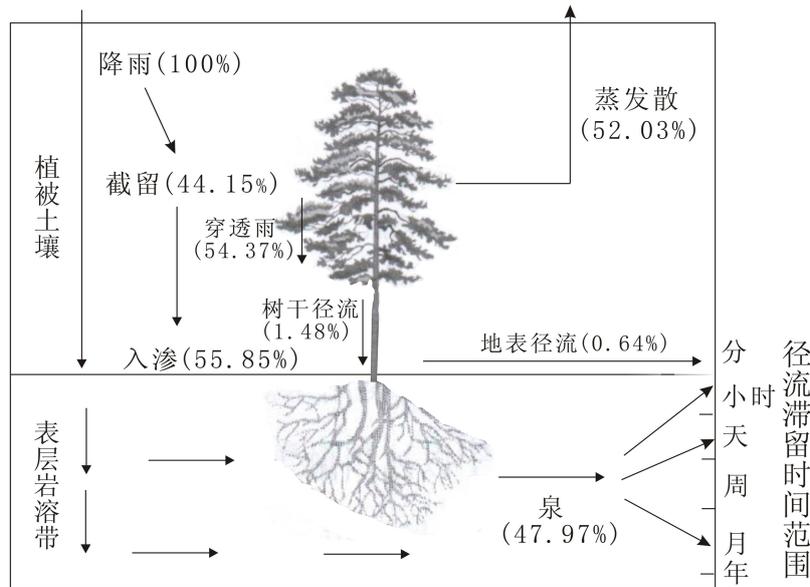


图 7 桂林丫吉试验场 S31 号表层岩溶泉域水量平衡图

Fig. 7 Water balance of No. 31 epikarst spring catchment at Yaji test site in Guilin

4 讨论

4.1 两种岩溶植被对降雨的再分配及其对表层岩溶带的补给

植被对降雨的再分配作用改变了降雨对表层岩溶带的补给形式,将降雨再分配为穿透雨、树干径流和冠层截留 3 个主要部分,穿透雨和树干径流则是进入表层岩溶带的两个分量。两个不同林型(香椿林和云实林)的穿透雨率、树干径流率和林冠截留率分别为 59.65%、2.86%、37.48% 与 52.11%、0.89%、47%。对于香椿林而言,降雨经过林冠的再分配,其中的 62.52% 水分转成穿透雨和树干径流补给表层岩溶带,而该样地岩溶不发育,岩溶含水介质由溶隙和溶孔等微形态组成,连通性差,CF18 钻孔水位变幅较小。而在云实灌丛中,降雨中的 53% 以穿透雨和树干径流的形式补给表层岩溶带,但云实林地下岩溶裂隙发育,连通性好,穿透雨和树干径流进入地下后沿着大裂隙快速补给 CF16 钻孔,钻孔水位对降雨快速响应。因此,在 S31 号泉表层岩溶生态系统中,植被冠层的降雨截留过程对钻孔水位的影响小,钻孔水位的变动则主要取决于地下岩溶含水介质和管道裂隙发育的程度。

前人研究表明,植被林冠下穿透雨率的比例在 69.6%~85% 之间,树干径流占总降雨量的比例约为 1.3%~12.3%,冠层截留率在 15%~45% 之间^[7-10]。相比之下,本研究穿透雨和树干径流率偏

低,而林冠截留率偏高。穿透雨和树干径流的降低,减少了降雨对表层岩溶带的总补给量。植被冠层对降雨起到缓冲作用,消减降雨动能,使其转化为能量较小的穿透雨和树干径流。穿透雨以连续波状的形式补给表层岩溶带^[4,26],激发形成表层岩溶带的慢速流,增加了慢速流在总径流中的比例^[26];而树干径流则以快速集中的方式补给表层岩溶带,通常会形成根部和大孔隙快速流。此外,由于树干径流在总降雨量中的比例较小(1.3%~12.3%),众多学者常忽略其水文功能。在本研究中,香椿的树干径流量占降雨量的比例最高为 16%,雨水集中快速沿着根部进入表层岩溶带,势必会对管道流、孔隙流及碳酸盐岩的溶蚀产生一定的影响,在野外监测中也发现在植被根部有明显的树干径流溶蚀碳酸盐岩的痕迹。

因此,在不同地区进行植被恢复时需考虑到林冠的截留能力。在降雨量不足,较为干旱的地区进行植被恢复时,应该选择截留能力较弱的树种,使得更多的降雨能够进入到土壤和表层岩溶带中最后形成地下径流;在降雨量充足的石漠化地区进行植被恢复时可选择截留能力较强的树种,既使得降水更多的归还到大气中,又能发挥植被林冠对降雨的缓冲作用,减少水土流失,起到保持水土和涵养水源的作用。

4.2 典型表层岩溶泉域的生态水文效应

表层岩溶泉是典型的雨源补给型,探究植被对表层岩溶带的调节作用,是客观评估表层岩溶水资源潜力、加强流域生态保护和水资源开发利用协调发展的

基础。在监测期间,泉域内总降雨量的 52.03% 消耗于蒸发蒸腾,与国内外树木蒸腾量占总蒸散量的比例 43%~68% 的范围^[27-28]相符。桂林丫吉试验场 S31 号表层岩溶泉域蒸散发占降水量的 52.03%,年径流总量占降水量的 47.97%。王彦辉等^[29]总结了北方干旱缺水地区的植被蒸散耗水,结果表明自然草地、灌丛、高大乔木林的蒸散量分别占降水量的 63%、98%、105%,以此将自然草地划为水源生产型,灌丛为水源平衡型,高大乔木林划为水源消耗型。因此,该植被-土壤-表层岩溶带系统对于浅层泉水径流的贡献有较好的涵养作用。本研究对西南表层岩溶水的开发利用和生态保护具有一定的指导意义,但如果今后的研究能增加植被样地的数量,能系统考虑流域的植被结构参数及长期径流量,这样水量平衡法的结果更为可靠,也才能更好的开展表层岩溶泉域尺度的水量平衡研究,为西南石漠化区水源林的建设、生态修复和水资源综合利用提供技术支撑。

5 结 论

本文在桂林丫吉试验场 S31 号泉域植被特征分析的基础上,定位监测泉域内香椿和云实两种主要植被的穿透雨和树干径流特征以及钻孔水和表层岩溶水的变化,得到如下结论:

(1) 植被冠层改变了降雨对表层岩溶带的补给形式和补给量。降雨经过植被冠层的截留后转化成穿透雨和树干径流进入表层岩溶带,植被的截留减少了降雨对表层岩溶带的总补给量。植被冠层的降雨截留过程对钻孔水位的影响小,钻孔水位的变动则主要取决于地下岩溶含水介质和管道裂隙发育的程度。

(2) 运用水量平衡法,计算了以灌丛覆盖为主的桂林丫吉试验场 S31 号表层岩溶泉域年蒸散量为 1 623.81 mm,占降水量的 52.03%,年径流深度为 1 497.39 mm,占降水量的 47.97%。蒸散发是流域水分输出的主要形式。

参考文献

- [1] 蒋忠诚,王瑞江,裴建国. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能[J]. 中国岩溶,2001,20(2): 106-110.
- [2] 劳文科,蒋忠诚,时坚,等. 洛塔表层岩溶带水文地质特征及其水文地质结构类型[J]. 中国岩溶,2003,22(4):258-266.
- [3] 覃小群,蒋忠诚. 表层岩溶带及其水循环的研究进展与发展方向[J]. 中国岩溶,2005,24(3):250-254.
- [4] 邹胜章,朱志伟,梁彬,等. 生态系统变化对湘西岩溶水资源的影响[J]. 水文地质工程地质,2004,31(5):26-30.
- [5] 王金叶,于澎涛,王彦辉. 森林生态水文过程研究-以甘肃祁连山水源涵养林为例[M]. 北京:科学出版社,2008:71.
- [6] 余新晓,张志强,陈丽华,等. 森林生态水文[M]. 北京:中国林业出版社,2004:255.
- [7] Staelens J, Schrijver A D, Verheyen K, et al. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 330:651-662
- [8] Parker G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle [J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13, 57-133.
- [9] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京:中国林业出版社,1993:70-73.
- [10] 范世香,高雁,程银才,等. 林冠对降雨截留能力的研究 [J]. 地理科学,2007,27(2):200-204.
- [11] 马波,李占斌,马璠,等. 模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响 [J]. 生态学报,2015,35(2):497-507.
- [12] 段文军,李海防,王金叶,等. 漓江上游典型森林植被对降水径流的调节作用[J]. 生态学报,2015,35(3):663-669.
- [13] 方书敏,赵传燕,荐圣淇,等. 陇中黄土高原油松人工林林冠截留特征及模拟 [J]. 应用生态学报,2013,24(6):1509-1516.
- [14] 荐圣淇,赵传燕,方书敏,等. 黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘灌丛的降雨截留特征 [J]. 应用生态学报,2012,23(9):2383-2389.
- [15] 孙忠林,王传宽,王兴昌,等. 两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子[J]. 生态学报,2014,34(14):3978-3986.
- [16] 谢江左,康文星. 植被系统调蓄水量的功能研究[J]. 湖南林业科技,1996,23(1):53-58.
- [17] 韩永刚,杨玉盛. 森林水文效应的研究进展[J]. 亚热带水土保持,2007,19(2):20-24.
- [18] 范世香,裴铁番,蒋德明,等. 两种不同林分截留能力的比较研究[J]. 应用生态学报,2000,11(5):671-674.
- [19] Samba S A N, Camire C, Margolis H A. Allometry and rainfall interception of *Cordyla pinnata* in a semi-arid agroforestry parkland Senegal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 154(1-2):277-288.
- [20] 尹佃忠. 森林植被对地下水补给作用分析[J]. 地下水,2003,25(1):9-10.
- [21] 姜光辉,郭芳. 我国西南岩溶区表层岩溶带的水文动态分析 [J]. 水文地质工程地质,2009(5):89-93.
- [22] 常勇,吴吉春,姜光辉,等. 峰丛洼地岩溶泉流量和水化学变化过程中地面径流的作用[J]. 水利学报,2012,43(9):1050-1057.
- [23] 袁道先,戴爱德,蔡五田,等. 中国南方裸露型岩溶峰山区岩溶水系统及其数学模型的研究:以桂林丫吉为例[M]. 桂林:广西师范大学出版社,1996:88-118.
- [24] 王安志,裴铁璠. 森林蒸散测算方法研究进展与展望[J]. 应用生态学报,2001,12(6):933-937.
- [25] 孙昌禹,董博飞,董文琦. 区域蒸散量估算技术研究进展[J]. 河北农业科学,2006,10(3):103-106.
- [26] Krishnaswamy J, Bonell M, Venkatesh B, et al. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical hu-

- mid forest ecosystems to use and reforestation; Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis” [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 498, 191-209.
- [27] 高人. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型水量平衡研究 [J]. *水土保持通报*, 2002, 22(2):5-8.
- [28] Giambelluea T W, Ziegler A D, Nullet M A, et al. Transpiration in a small tropical forest patch [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2003, 117(12):1-22.
- [29] 王彦辉,熊伟,于澎涛,等. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4):19-26.

Redistribution of precipitation by vegetation and its ecohydrological effects in a typical epikarst spring catchment

DENG Yan^{1,2}, JIANG Zhongcheng², XU Ye², YUE Xiangfei², LI Xuyao², LIANG Jintao²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Key laboratory of Karst ecosystem and rocky desertification treatment / Karst Dynamics Laboratory, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Study of precipitation redistribution by vegetation and its effects on epi-karst water in southwest of China could guide the ecological protection and comprehensive development and utilization of karst water resources. Based on the analysis of the characteristics of two typical plants, this paper presents a study on this issue in a typical epikarst spring catchment, Southwest China. The results show that the through rainfall in *Toona sinensis* (S1) vegetation is 1,861.83 mm, accounting for 59.65% of the total precipitation. Through rainfall in *Caesalpinia decapetala* (S2) vegetation is 1,626.42 mm, accounting for 52.11% of the total precipitation. The through rainfall rate decreases with increasing precipitation. Stem flow in S1 is 89.4 mm, accounted for 2.86% of total precipitation. Stem flow in S2 was 27.79 mm, accounted for 0.89% of total precipitation. Interception storage in S1 and S2 are 1,169.97 mm and 1,466.99 mm, accounting for 37.48% and 47.01% of total rainfall, respectively. Using the water balance method, annual evapotranspiration in the Yaji typical epikarst spring catchment is 1,623.81 mm, accounting for 52.03% of the precipitation, and runoff depth is 1,497.39 mm, accounting for 47.97% of the precipitation. Canopy could change the precipitation recharge pattern and quantity to epi-karst zone. Precipitation is intercepted by canopy and partitioned into through rainfall and stem flow, while through rainfall supplements the epi-karst zone in a continuous wave-like manner. The vegetation interception can reduce the total supply of rainfall to the epi-karst zone, but increases the effective supply. Compared with *Caesalpinia decapetala*, *Toona sinensis* vegetation would increase the effective recharge to epikarst zone.

Key words epikarst spring catchment, interception storage, redistribution of precipitation, water balance

(编辑 吴华英)