

元江稀树灌丛降雨再分配及其与气象因子的关系

熊 壮¹, 叶 文^{1*}, 张树斌^{2,3*}, 杨大新^{2,3}

(1. 西南林业大学 地理学院, 云南 昆明 650224; 2. 中国科学院 西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南 勐腊 666303;
3. 中国科学院 西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站, 云南 元江 653300)

摘 要:中国西南干热河谷地区广泛分布有稀树灌丛植被, 气候条件干热, 水热矛盾异常明显, 然而对其降雨再分配缺乏研究。本研究选择了元江干热河谷稀树灌丛进行了 1 a 的监测, 开展降雨再分配及其影响因素分析。结果表明, 观测期间总降雨量为 762.9 mm, 穿透雨量、树干径流量和林冠截留量分别为 639.3、14.6 mm 和 109.0 mm, 分别占总降雨量的 83.8%、1.9% 和 14.3%, 当降雨量 > 1.1 mm 时开始产生穿透雨; 降雨量 > 1.4 mm 时, 开始产生树干径流。降雨再分配各分量与降雨量、降雨强度和气温均具有显著的相关关系 ($P < 0.01$), 其中降雨量是与降雨再分配关系最密切的气象因子, 即随着降雨量的增加, 穿透雨量、树干径流量均增大, 穿透雨率、树干径流率先增加后趋于稳定, 而林冠截留率先减小后趋于稳定。该地区植被分布稀疏、群落结构简单、群落层次少、郁闭度低等原因造成稀树灌丛的穿透雨率相对较高, 林冠截留率较低。

关键词:干热河谷; 稀树灌丛; 穿透雨; 树干径流; 林冠截留

中图分类号: S715

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2019)01-0047-07

Rainfall Redistribution and Its Relationship with Meteorological Factors in Yuanjiang Valley-type Savanna, Southwest China

XIONG Zhuang¹, YE Wen^{1*}, ZHANG Shu-bin^{2,3*}, YANG Da-xin^{2,3}

(1. School of Geography, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China;
3. Yuanjiang Savanna Ecosystem Research Station, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yuanjiang 653300, Yunnan, China)

Abstract: Savanna distributes widely in the dry-hot valleys of southwest China with hot and dry climate conditions, and the seasonal drought is very obvious. However, the research about the rainfall redistribution and its influencing factors are particularly insufficient. In this study, 1-year monitoring was carried out in savanna of Yuanjiang dry-hot valley to analyze the rainfall redistribution and its influencing factors. The results showed that the total annual precipitation was 762.9 mm, and the throughfall, stemflow and canopy interception were 639.3, 14.6 and 109.0 mm, respectively, accounted for 83.8%, 1.9% and 14.3% of total precipitation. The threshold rainfalls for forming throughfall and stemflow were 1.1 and 1.4 mm, respectively. The components of rainfall redistribution were significantly correlated with rainfall quantity, rainfall intensity and air temperature ($P < 0.01$). Meanwhile, rainfall was the most significant meteorological factor for the rainfall redistribution, which was in accordance with the previous results from other vegetation types. With the increase of rainfall, the amount of throughfall and stemflow increased. The ratios of throughfall and stemflow increased first and then stabilized, whereas, the ratio of canopy interception de-

收稿日期: 2018-04-21 修回日期: 2018-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(31600479); 中国科学院西部之光项目(Y7XB081K01)。

作者简介: 熊 壮, 男, 硕士研究生, 研究方向: 森林水文和森林生态学。E-mail: allanlqm@qq.com

* 通信作者: 叶 文, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 地理学和旅游学的科研工作。E-mail: ywenyn@qq.com

张树斌, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 植物生理生态学。E-mail: zhangshubin@xtbg.ac.cn

creased first and then stabilized as the rainfall increased. The Chinese savanna has a sparse vegetation, simple community structure and low canopy density, which results higher throughfall ratio and lower canopy interception ratio.

Key words: dry-hot valley; savanna; throughfall; stemflow; canopy interception

森林水文动态过程是森林生态学研究的重要内容,森林林冠对降雨的再分配作用是森林水文动态的基本过程之一^[1],同时也是水文地理学研究的重要范畴。森林林冠对降雨进行再分配,不仅能够改变降雨进入森林生态系统后的空间分布格局,形成林下穿透雨和树干径流,还关系到森林中水分平衡,影响区域的水文、土壤化学过程,从而对整个森林生态系统水分循环产生影响,并直接影响到森林生态系统服务功能的发挥^[2-6]。

我国西南地区,山高谷深,河流众多,在金沙江、澜沧江、怒江和元江的河谷地区,由于焚风效应和封闭地形影响了大气局部环流,形成独特的干热河谷,季节性干旱明显,日照时间长,辐射强烈,降雨分配极不均衡,年蒸发量是年降雨量的数倍,土壤干旱贫瘠,在这样的气候条件下发育形成的稀树灌丛(河谷型萨王纳, Valley-type savanna)是该地区的主要植被类型^[7]。作为一类特殊分布的半干旱区植被类型^[8],稀树灌丛的水热矛盾突出,水分成为该地区植物生长和植被生产力最主要的限制因子^[9-10]。长期以来,干热河谷地区人口密度大,人类活动干扰强烈,再加上自然环境演变所决定的生态环境的脆弱性,对环境系统扰动的自我修复能力弱,生态安全形势严峻,生态问题具有典型性和代表性,这也制约着当地的社会经济的可持续发展^[11]。因此,对于干旱河谷这种受水分严重制约的特殊环境,研究稀树灌丛降雨再分配规律及其主要影响因子,弄清楚该植被类型的水文动态就具有重要的理论和实际意义。然而,国内学者对阔叶林、针叶林等大范围尺度植被类型的研究较多,对于干热河谷稀树灌丛这种特殊植被类型研究却相对较少,所以对于这类植被的降雨再分配动态过程及其对气象因子的响应机制尚不清楚。

本研究以元江干热河谷稀树灌丛生态系统为对象,于2016年开展了1 a的动态监测,以揭示干热河谷地区稀树灌丛降雨再分配的规律及其对环境因子的响应机制,为我国西南地区干热河谷开展生态系统水分供给机制的研究提供科学数据,也为水资源与生态环境的承载力及社会经济发展规模约束条件下干热河谷地区可持续发展途径与策略研究提供重要参考。

1 研究区概况

研究区位于中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站(简称元江生态站, 102°10'E, 23°28'N),海拔481 m。该区域年平均温度24.7℃,年平均降雨量732.8 mm,年平均蒸发量2 434 mm,发生在雨季(5—10月)的降雨占78%,干湿季分明,年平均相对湿度67%,年平均水汽压2.17 hPa,年平均日照时数2 350 h,全年盛行东南风,年平均风速1.6 m·s⁻¹,土壤以燥红土为主。在元江生态站附近选择群落结构稳定、层次丰富的天然稀树灌丛,划定30 m×30 m的样地作为观测的水文场,该样地内植株密度约为800株·hm⁻²(仅统计胸径>5 cm的植株,下同),平均胸径10.6±0.7 cm,平均树高6.4±0.2 m,平均枝下高2.7±0.2 m,优势乔木树种是厚皮树(*Lannea coromandelica*),伴有少量的大乔木异序乌桕(*Sapium insigne*)。

2 研究方法

2.1 降雨及各分量的测定

2.1.1 林外降雨量的测定 在距离水文场约300 m的空旷地设置气象观测场,记录每天的降雨、气温、相对湿度、水汽压、光照、风速等气象数据,以降雨间隔≥4 h作为划分2场降雨的标准^[12]。

2.1.2 穿透雨量的测定 在水文场中,选择地势稍微低平的地点,随机设置6个穿透雨收集槽。穿透雨收集槽为自制槽型容器(120 cm×30 cm),用不锈钢铁皮焊制,为避免地表草本植物干扰,将收集槽放置在高50 cm不锈钢架上,槽的一端开小孔接PVC管,用25 L塑料桶收集雨水,槽内装有过滤网,定期清理树叶等凋落物。根据每次记录收集到的雨水量,换成为单位面积上的穿透雨量(mm)。

2.1.3 树干径流量的测定 根据在水文场内树木的径级别,选取地形平坦、树干尽量竖直的胸径在10~15、15~20、20~25、25~30 cm区间的优势乔木树种各2棵作为测量树干径流的样木,共设置8棵(表1)。用纵向切开的PVC管缠绕树干1.5周以上,用不锈钢钉将管子撑开并固定在树干上,用玻璃胶密封管与树皮间的缝隙,PVC管下端伸入一个25 L塑料桶内,用来接收收集的雨水(图1),根据每次记录收集到的雨水量,再换算成为单位面积上的

树干径流量 $S(\text{mm})$,具体计算公式为:

$$S=\frac{V}{A}\cdot 1\,000\tag{1}$$

式中: S —树干径流量(mm); V —树干径流收集量(m^3); A —树冠投影面积(m^2)。

表 1 样木的基本特征

Table 1 Characteristics of the sample trees

序号	树种	胸径 /cm	树高 /m	枝下高 /m	冠幅投影 面积/ m^2
1	异序乌桕	29.6	7.9	1.5	53.2
2	厚皮树	15.2	6.8	3.3	28.6
3	厚皮树	19.8	7.8	2.6	36.7
4	厚皮树	21.5	7.3	1.2	42.3
5	厚皮树	22.9	9.3	2.6	38.6
6	厚皮树	14.9	7.3	3.4	20.7
7	厚皮树	14.0	6.4	2.3	24.8
8	厚皮树	28.1	8.8	3.1	38.0



图 1 树干径流收集装置

Fig. 1 Collecting device of stemflow

2.1.4 林冠截留量的计算 林冠截留量 $C(\text{mm})$ 的计算公式为:

$$C=R-T-S\tag{2}$$

式中: C —林冠截留量(mm); R —大气降雨量(mm); T —穿透雨量(mm)。

2.2 数据分析

根据每场降雨所收集到的穿透雨量、树干径流量计算出林冠截留量,可得到该植被类型的降雨再分配格局,并用函数关系分别拟合穿透雨率、树干径流率、林冠截留率与林外降雨的关系。采用 SPSS 16.0 进行数据分析,利用 Pearson 相关分析方法研究各降雨分量与气象因子之间的关系,并利用软件 SigmaPlot 10.0 绘图。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

2016 全年共观测到降雨 141 场,累计降雨量 762.9 mm,按降雨量级标准^[13]划分见表 2,最大降雨量 39.4 mm,最小降雨量 0.1 mm,平均单场降雨

量 5.4 mm。其中,81.6%为降雨量 $<10.0\text{ mm}$ 的小雨,累计占总降雨量的 38.6%,而降雨量 $>10.0\text{ mm}$ 的中到大雨占总降雨次数的 18.4%,但累计达到总降雨量的 62.4%,说明该地区的降雨频度分布以小雨为主,降雨量的累积量主要依靠中到大雨。

表 2 元江干热河谷降雨特征

Table 2 Characteristics of rainfall in Yuanjiang dry-hot valley

项目	降雨量级/mm			合计
	小雨 (<10.0)	中雨 ($10.0\sim 24.9$)	大雨 ($25.0\sim 49.9$)	
降雨次数/场	115	22	4	141
降雨日百分比/%	81.6	15.6	2.8	100.0
降雨量/mm	294.5	329.4	139.0	762.9
降雨量百分比/%	38.6	43.2	18.2	100.0

3.2 穿透雨特征

当降雨量达到 1.1 mm 时可产生穿透雨,穿透雨与降雨量呈显著的线性相关关系(图 2A),研究期间总穿透雨量为 639.3 mm,占总降雨量的 83.8%(表 3),当降雨量 $<10\text{ mm}$ 时,穿透雨率较低(74.1%),当降雨量 $>10\text{ mm}$ 时,穿透雨率骤然升高,甚至可达 91.5%,由图 2B 也可发现此规律,在降雨量较小时穿透雨率随着降雨量的增加会快速增加,在降雨量 $>8\text{ mm}$ 后趋于平缓,并最终稳定在 80%~90%。

3.3 树干径流特征

当降雨量达到 1.4 mm 时可产生树干径流,树干径流与降雨量呈线性相关关系(图 2C),研究期间总树干径流量为 14.6 mm,占总降雨量的 1.9%(表 3),当降雨量较小($<10\text{ mm}$)时,树干径流率较低(1.4%),随着降雨量的增加,树干径流率也相应增加,特别是当降雨量为 10.0~24.9 mm 时,树干径流率达到最高(2.4%),说明中雨最有利于产生树干径流。树干径流率随着降雨量的增大而增大的趋势在降雨量为 8 mm 时会发生变化,降雨量 $>8\text{ mm}$ 后会逐渐变缓,并最终稳定在 2%左右(图 2D)。

3.4 林冠截留特征

全年林冠截留量为 109.0 mm,占总降雨量的 14.3%(表 3),当降雨量较小($<10\text{ mm}$)时,林冠截留率较高(24.6%),当降雨量为 25.0~49.9 mm 时,林冠截留率最低(6.6%),说明林冠截留率与降雨量成负的相关关系,随着降雨量的增加,林冠截留率是越来越低的,最终在降雨量 $>8\text{ mm}$ 后稳定在 10%~20%(图 2F)。

3.5 降雨再分配与主要气象因子的相关关系

表 4 表明降雨量、降雨强度和气温与降雨再分配的关系较为密切,其中除了气温与林冠截留量的

相关性较低外,降雨量、降雨强度和气温与降雨再分配均有极显著的相关性($P < 0.01$);相对湿度和光照与穿透雨率、树干径流率和林冠截留率的相关性

要高于穿透雨量、树干径流量和林冠截留量的相关性;而水汽压和风速与降雨再分配均没有显著的相关性($P > 0.05$)。

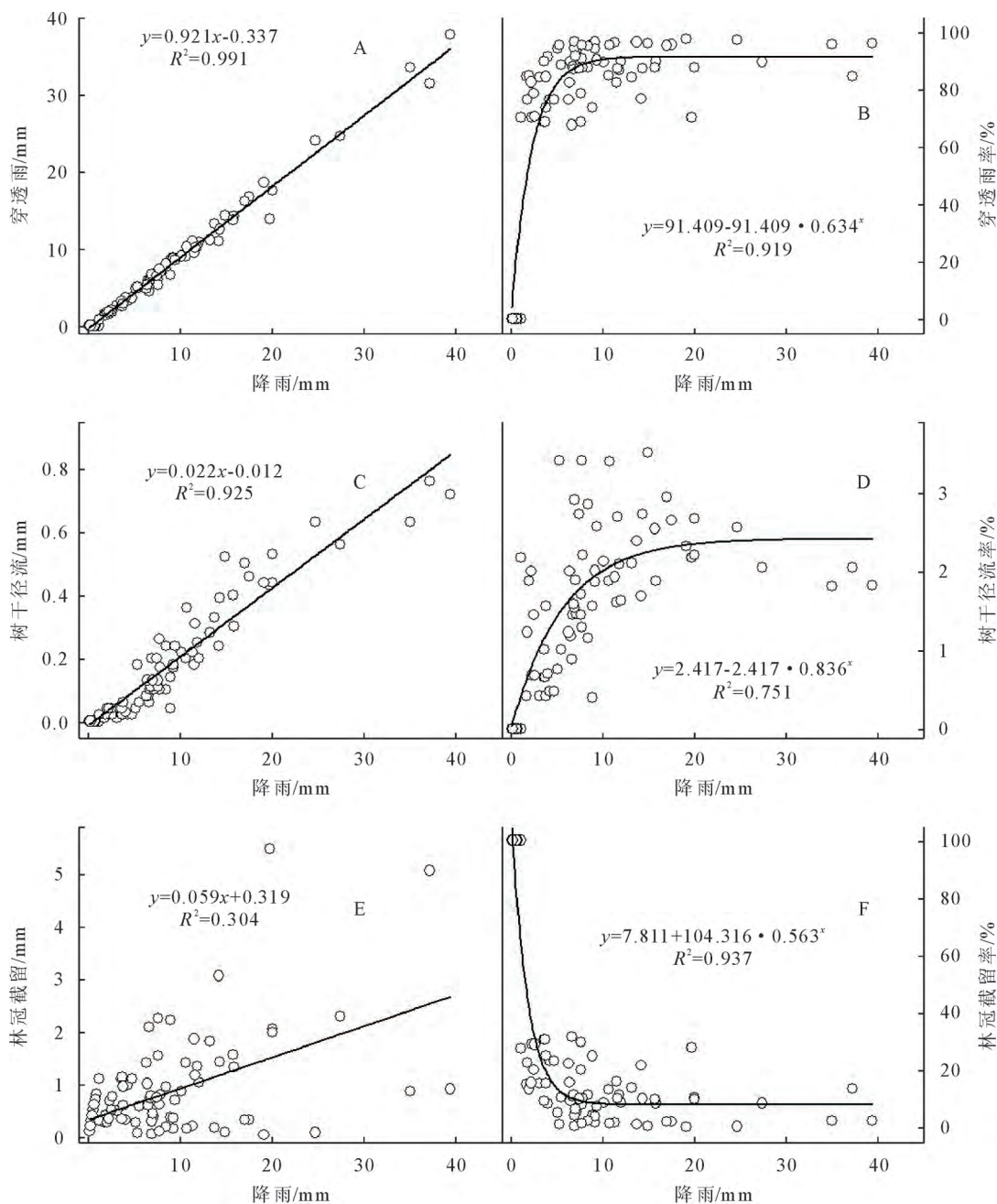


图2 降雨再分配与降雨量的关系

Fig. 2 Relationship between rainfall redistribution and rainfall

表3 元江干热河谷稀树灌丛降雨再分配

Table 3 Summary in the rainfall redistribution of savanna in Yuanjiang dry-hot valley

降雨量级 /mm	降雨次数 /场	降雨量 /mm	穿透雨		树干径流		林冠截留	
			数量/mm	穿透雨率/%	数量/mm	树干径流率/%	数量/mm	林冠截留率/%
<10	115	294.5	218.1	74.1	4.1	1.4	72.3	24.6
10.0~24.9	22	329.4	294.0	89.3	7.8	2.4	27.6	8.4
25.0~49.9	4	139.0	127.2	91.5	2.7	1.9	9.1	6.6
合计	141	762.9	639.3	83.8	14.6	1.9	109.0	14.3

表 4 降雨再分配与主要气象因子的相关关系

Table 4 Correlation analysis of rainfall redistribution with main meteorological factors

	穿透雨		树干径流		林冠截留	
	数量	穿透雨率	数量	树干径流率	数量	林冠截留率
降雨量	0.986**	0.578**	0.954**	0.636**	0.350**	−0.582**
降雨强度	0.493**	0.338**	0.535**	0.407**	0.327**	−0.341**
气温	−0.235**	−0.287**	−0.266**	−0.360**	0.103	0.290**
相对湿度	0.082	0.291**	0.072	0.190*	−0.028	−0.290**
水汽压	−0.007	0.029	−0.057	−0.113	0.087	−0.025
风速	0.073	−0.067	0.102	0.066	−0.070	0.064
光照	−0.089	−0.194*	−0.118	−0.239**	−0.169*	0.196*

注: *表示 $P<0.05$; **表示 $P<0.01$ 。

表 5 不同植被类型降雨再分配特征比较

Table 5 Comparison of rainfall redistribution characteristics of different vegetation types

植被类型	研究地点	降雨量 /mm	穿透雨			树干径流			林冠截留		文献
			穿透 雨量 /mm	穿透 雨率 /%	临界产 流雨量 /mm	树干 径流量 /mm	树干 径流率 /%	临界产 流雨量 /mm	林冠 截留量 /mm	截留率 /%	
热带季节雨林	云南西双版纳	1 594.50	853.20	41.43	—	80.70	5.24	—	660.60	53.74	[4]
橡胶林	云南西双版纳	1594.50	1096.80	67.85	—	104.10	6.68	—	393.50	24.68	[4]
稀树灌丛	云南元江	762.90	639.30	83.80	1.10	14.60	1.90	1.40	109.00	14.30	本研究
常绿阔叶林	云南哀牢山	1884.11	1637.06	86.89	5.00	3.14	0.17	14.00	243.92	12.95	[21]
毛竹林	江西大岗山	531.60	382.60	71.97	—	46.70	8.78	—	102.30	19.20	[23]
常绿阔叶林	江西大岗山	531.60	348.50	65.56	—	47.80	8.99	—	135.30	25.50	[23]
杉木林	江西大岗山	531.60	361.90	68.08	—	7.20	1.35	—	162.40	30.50	[23]
常绿阔叶林	浙江天童山	1348.80	1102.20	81.70	2.00	31.60	2.30	2.00	215.80	16.00	[20]
针阔叶混交林	秦岭	726.47	588.20	80.96	1.30	11.69	1.61	6.00	126.58	17.43	[22]
河谷灌丛	青海湖流域	156.67	75.83	48.40	1.10	6.33	4.04	1.87	47.56	74.51	[18]
落叶松桦木混交林	冀北山地	167.23	115.31	68.94	2.21	4.35	2.56	2.00	47.57	28.45	[17]
山杨桦木混交林	冀北山地	167.23	115.08	68.81	2.72	5.90	3.47	2.00	46.25	27.66	[17]
油松蒙古栎混交林	冀北山地	167.23	125.94	75.31	1.34	6.24	3.67	2.00	35.05	20.96	[17]
华北落叶松林	河北塞罕坝	348.40	266.70	76.56	1~2	1.98	0.57	3.00	79.70	22.87	[24]
樟子松林	科尔沁沙地	166.80	115.56	69.28	0.85	2.11	1.26	2.44	49.13	29.46	[19]
蒙古栎林	黑龙江帽儿山	567.10	434.00	76.00	1.00	37.10	6.54	3.10	96.00	16.93	[16]
杂木林	黑龙江帽儿山	567.10	482.40	85.00	0.70	29.60	5.22	3.10	55.10	9.72	[16]
落叶松林	大兴安岭	184.00	148.61	80.77	—	0.25	0.14	3.60	35.14	19.10	[1]

4 结论与讨论

4.1 结论

元江干热河谷稀树灌丛的穿透雨量、树干径流量、林冠截留量分别为 639.3、14.6、109.0 mm,分别占总降雨量的 83.8%、1.9%、14.3%。降雨量>1.1 mm 时开始产生穿透雨;降雨量>1.4 mm 时开始产生树干径流。

降雨再分配各分量与降雨量的关系最密切,其中穿透雨量和树干径流量与降雨量呈线性正相关关系,穿透雨率和树干径流率随降雨量的增大而先增大后趋于平稳,林冠截留率随降雨量的增大而先减小后趋于平稳。

相比国内其他植被类型,稀树灌丛的穿透雨率

较高(83.8%),林冠截留率较低(14.3%),主要是由于该地区的植被分布稀疏,群落结构简单等导致的群落层次少、郁闭度低等原因造成的。

4.2 讨论

在本研究期间,共监测到降雨 141 场,累计降雨量 762.9 mm(表 2),穿透雨量、树干径流量、林冠截留量分别为 639.3、14.6、109.0 mm,分别占总降雨量的 83.8%、1.9%、14.3%(表 3)。与全国其他森林类型相比,元江干热河谷稀树灌丛的穿透雨率相对较高,而林冠截留率较低(表 5),这可能与当地的植被特征有关。干热河谷地区气温高,年蒸发量是年降雨量的数倍,季节性干旱明显,还具有许多不利于植物生长的条件,比如该区域属于喀斯特地貌区,裸岩面积大,浅薄的土壤层下可溶性岩石多缝隙,贮

水能力差^[14]等,所发育的稀树灌丛植被群落高度较低且分布稀疏^[15],这就导致森林的冠层厚度和郁闭度都较低。再加上植物多样性低,群落结构简单^[15-16],群落层次少,林冠截留的能力就弱,降雨多穿过林冠间隙及林窗直接落到地面,所以该地区的穿透雨率就相对偏高。因此,在该地区只要降雨量达到 1.1 mm 即可产生穿透雨,通过比较,属于较低的临界值;而树干径流的临界产流降雨仅为 1.4 mm,远远低于全国其他森林类型,这除了林木稀疏、林冠截留能力较弱的原因外,还与树木的本身特性有关,该地区的优势树种如厚皮树(*Polyalthia cerasoides*)、异序乌桕(*Sapium insigne*)、老人皮(*Lannea coromandelica*)等都是阔叶树种,叶片面积大,枝条的分枝角度较小,有利于将叶片截留的雨水向树干汇集。同时树皮也非常光滑且质地较硬,吸水能力不强,不需要很强的降雨即可达到饱和,所以产生树干径流的临界降雨量相对较低。

对降雨再分配可能有影响的气象因子中,降雨量、降雨强度和气温的关系较为密切,其中又以降雨量与降雨再分配的相关性最高,这与其他植被类型的降雨再分配研究结果相一致^[4,17-21,23-25]。穿透雨量、树干径流量和林冠截留量均与降雨量呈显著的正相关关系,即随着降雨量的增大而显著增大(图 2A、C、E);穿透雨率、树干径流率和林冠截留率与降雨量的关系有一个节点即降雨量 8 mm,当降雨量 < 8 mm 时,穿透雨率和树干径流率会随着降雨量的增大而显著增大,林冠截留率则显著减小;当降雨量 > 8 mm 时,穿透雨率、树干径流率和林冠截留率的变化均会减小,趋于平稳(图 2B、D、F)。这与马育军^[19]等研究高寒河谷灌丛降雨再分配的结果一致,可能是因为同为灌丛类植被类型,在植物枝条、树干、叶片等截留雨水的方式方面有一定的相似性。其中,林冠截留率与降雨量呈负相关关系,说明植物叶片、枝条对雨水的吸收及蒸发散有一个极限,降雨初期或降雨量较小时,雨水多被冠层截留、蒸发散而消耗掉,随着降雨量的增加,冠层的截留能力达到饱和,截留率就逐渐下降,最终趋于平稳。降雨强度对降雨再分配的影响,是由于雨滴对植物冠层的撞击作用造成的,当降雨强度大时,单位时间内降雨量大,雨滴的动能也较大,植物叶片在雨滴的撞击下会抖动、下垂,原本截留在叶片上的雨水也会被抖落变成穿透雨,此时截留雨水的能力较低,降雨基本以穿透雨的形式降落;而当降雨强度小时,单位时间内降雨量小,雨滴对叶片的撞击作用小,叶片可以保持舒展、挺直的形态,能拦截较多的雨水^[4]。

本研究针对元江干热河谷稀树灌丛中的乔木层

的定点观测,明确了穿透雨、树干径流和林冠截留的变化规律,确定了降雨再分配各部分产生的阈值及其与气象因子的关系。稀树灌丛自身的特点决定了降雨多以穿透雨的形式直接落到林下地面,在雨量大、强度大的雨季更是如此,但是在本研究期间并未发现有严重的林下水土流失现象,这可能与乔木层下生长的灌木层和草本层有关,它们对穿透雨也会有一定的截留和缓冲的能力,在整个生态系统中发挥着一定的功能,所以这也提供了一个新的研究方向,今后需继续进行相关研究。

参考文献:

- [1] 石磊,盛后财,满秀玲. 兴安落叶松林降雨再分配及其穿透雨的空间异质性[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(2): 90-96.
SHI L, SHENG H C, MAN X L, et al. Rainfall redistribution and the spatial heterogeneity of throughfall in *Larix gmelinii* forest, northeast China[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2017, 41(2): 90-96. (in Chinese)
- [2] NANKO K, ONDA Y, ITO A, et al. Spatial variability of throughfall under a single tree; experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(9): 1173-1182.
- [3] 李振新,郑华,欧阳志云,等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征[J]. 生态学报,2004,24(5):1015-1021.
LI Z X, ZHENG H, OUYANG Z Y, et al. The spatial distribution characteristics of throughfall under *Abies faxoniana* forest in the wolong Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 1015-1021. (in Chinese)
- [4] 张一平,王馨,王玉杰. 西双版纳地区热带季节雨林与橡胶林林冠水文效应比较研究[J]. 生态学报,2003,23(12):2653-2665.
- [5] 刘茜,满秀玲,田野宏,等. 大兴安岭北部白桦次生林降雨再分配金属元素季节动态[J]. 水土保持学报,2014,28(5):119-123,133.
LIU X, MAN X L, TIAN Y H, et al. Study on seasonal dynamics of rainfall redistribution metal elements of *Betula platyphylloides* secondary forests in north of Greater Xing'an Mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 119-123, 133. (in Chinese)
- [6] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(I)[J]. 西北林学院学报,2000,15(3):1-7.
- [7] 金振洲. 云南元江干热河谷半萨王纳植被的植物群落学研究[J]. 广西植物,1999,19(4):289-302.
- [8] 费学海,张一平,宋清海,等. 元江干热河谷太阳辐射各分量及反照率变化特征[J]. 北京林业大学学报,2016,38(3):1-10. (in Chinese)
- [9] FEI X H, ZHANG Y P, SONG Q H, et al. Characteristics of solar radiation distribution and albedo in Yuanjiang dry-hot valley, southwest China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(3): 1-10. (in Chinese)
- [9] ZHANG S B, ZHANG J L, CAO K F. Divergent hydraulic

- safety strategies in three co-occurring anacardiaceae tree species in a Chinese savanna[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 7:2075.
- [10] FEI X, JIN Y, ZHANG Y, *et al.* Eddy covariance and biometric measurements show that a savanna ecosystem in south-west china is a carbon sink[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(7): 41025.
- [11] 欧朝蓉, 孙永玉, 朱清科. 元谋干热河谷地区生态安全评价研究[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [12] STAELENS J, AN D S, VERHEYEN K, *et al.* Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 22(1): 33-45.
- [13] GB/T 28592—2012, 降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [14] 金艳强, 李敬, 张一平, 等. 元江干热河谷稀树灌丛植被碳储量及净初级生产力[J]. *生态学报*, 2017, 37(17): 1-7.
- JIN Y Q, LI J, ZHANG Y P, *et al.* Carbon storage and net primary productivity of a savanna ecosystem in a dry-hot valley in Yuanjiang, Yunnan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 1-7. (in Chinese)
- [15] 刘方炎, 朱华. 元江干热河谷植被数量分类及其多样性分析[J]. *广西植物*, 2005, 25(1): 22-25.
- LIU F Y, ZHU H. Numerical classification and diversity analysis for the vegetation in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province[J]. *Guihaia*, 2005, 25(1): 22-25. (in Chinese)
- [16] 张教林, 郝广友, 曹坤芳. 云南元江干热河谷木本植物的物候[J]. *武汉植物学研究*, 2009, 27(1): 76-82.
- ZHANG J L, HAO G Y, CAO K F. Phenology of woody species in Yuanjiang dry-hot valley in Yunnan Province[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2009, 27(1): 76-82. (in Chinese)
- [17] 孙忠林, 王传宽, 王兴昌. 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.
- SUN Z L, WANG C K, WANG X C, *et al.* Rainfall redistribution patterns and their influencing factors two temperate deciduous forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 3978-3986. (in Chinese)
- [18] 李淑春, 张伟, 姚卫星, 等. 冀北山地不同林分类型林冠层降水分配研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 124-131.
- LI S C, ZHANG W, YAO L X, *et al.* Precipitation distribution laws of different forest stands in North Mountain of Hebei Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(5): 124-131. (in Chinese)
- [19] 马育军, 高尚玉, 李小雁. 高寒河谷灌丛冠层降雨再分配特征及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(4): 963-971.
- MA Y J, GAO S Y, LI X Y, *et al.* Rainfall canopy partitioning and its influencing factors of riparian shrub in the alpine region[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(4): 963-971. (in Chinese)
- [20] 刘亚, 阿拉木萨, 曹静. 科尔沁沙地樟子松林降雨再分配特征. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2046-2055.
- LIU Y, ALAMUSA, CAO J. Characteristics of rainfall partitioning by *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest canopy in Horqin land, northern China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2046-2055. (in Chinese)
- [21] 彭舜磊, 由文辉. 天童亚热带常绿阔叶林降雨再分配的数量特征[J]. *中国科技论文在线*, 2010, 5(5): 387-393.
- [22] 甘健民, 赵恒康, 薛敬意. 云南哀牢山常绿阔叶林林冠对降雨的再分配[J]. *林业科技*, 1999, 24(4): 16-18.
- [23] 张胜利, 雷瑞德, 吕瑜良, 等. 秦岭火地塘林区森林生态系统水量平衡研究[J]. *水土保持通报*, 2000, 20(6): 18-22.
- [24] 李道宁, 王兵, 蔡体久, 等. 江西省大岗山主要森林类型降雨再分配特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2193-2200.
- LI D N, WANG B, CAI T J, *et al.* Rainfall redistribution traits of three main forest types in Dagangshan mountains of Jiangxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2193-2200. (in Chinese)
- [25] 刘春延, 李良, 赵秀海, 等. 塞罕坝地区华北落叶松人工林对降雨的截留分配效应[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(3): 1-5.
- LIU C Y, LI L, ZHAO X H, *et al.* Redistribution effects of tree canopy of *Larix principis rupprechtii* plantation on precipitation in the upper stream of Saihanba area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(3): 1-5. (in Chinese)