黔中山地喀斯特森林的水文学过程和养分动态

张 喜^{1 2} 薛建辉² 生原喜久雄³ 许笑天^{1 4}
田 野^{2 3} 户田诒夫³ 刘延惠¹

(1 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550011) (2 南京林业大学, 南京 210037)
(3 东京农工大学, 东京 183-8509 日本) (4 贵州大学, 贵阳 550001)

摘 要 采用不同林分类型固定样地的定位研究方法,研究了黔中山地喀斯特森林对降水量的分配和随降水流动的主要离子的影响。结果表明,林内外年降水量的变化趋势为:空旷地>林隙>乔木层>灌草层>地表和壤中流量>树干径流量。年降水在林内不同层次分配量的变化趋势为:林地蒸发等量>灌草层降水截留总量>林冠层降水截留总量。相关水量的月动态趋势以夏季较高,冬季较低。森林最大持水量的变化趋势为土壤层>植被层。植被层最大持水量的变化趋势为乔木层>枯落物层>灌木层>草本层。喀斯特原生林植被层地上部分最大持水量为 28.20 mm,是喀斯特次生林的 194.48%。喀斯特原生林土壤层最大持水量加权值为 19.24 mm,是喀斯特次生林的 187.89%。喀斯特原生林冠层降水截留总量、灌草层降水截留总量、地表蒸发等量总值占空旷地降水量的比例为 97.93%,喀斯特次生林的相应值为 97.89%。喀斯特原生林的调水能力大于喀斯特次生林。土壤层最大持水量占植被-土壤系统的 95.88%~96.11%,保土可增加蓄水。合理调整森林植被层结构既可防治土壤侵蚀,又可提高森林的最大持水潜力。随降水流动的 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 月均浓度在不同喀斯特森林类型的林隙、林内和树干径流中的年变化规律明显,夏季浓度较低,冬季浓度较高。固定样地集水区溪流中相关离子月均浓度变化趋势与林隙、林内和树干径流中的不同。喀斯特原生林年随降水输入的相关离子量为 $430.951 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,随地表径流和 90 cm 壤中流的输出量为 $49.789 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年随降水净增的相关离子量为 $381.162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而喀斯特次生林的相应值为 304.101、39.216 和 $264.885 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。喀斯特原生林 N^{3-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 储量高于喀斯特次生林,土壤层储量>植被层储量,植被层储量中乔木层>枯落物层>灌木层>草本层。年随降水输入喀斯特森林的相关离子量占植被-土壤系统的总量较小、有效性较高,对森林的生长和养分循环有重要的生态学意义。

关键词 喀斯特原生林 喀斯特次生林 水文过程 养分动态

NUTRIENT DYNAMICS AND HYDROLOGICAL PROCESS OF KARST FORESTS IN MOUNTAINOUS AREA OF CENTRAL GUIZHOU PROVINCE, CHINA

ZHANG Xi^{1 2}, XUE Jian-Hui², Kikuo Haibara³, XU Xiao-Tian^{1 4}, TIAN Ye^{3 2}, Hiroto Toda³, and LIU Yan-Hui¹

¹Guizhou Provincial Academy of Forestry, Guiyang 550011, China, ²Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China, ³Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-8509, Japan, and ⁴Guizhou University, Guiyang 550001, China

Abstract *Aims* Karst forest occurs with limestone soil and humid climate. China's southern karst region is subtropical and centered in Guizhou Province. Precipitation is high and unequally distributed seasonally. Soil drought is frequent as a result of climatic and edaphic factors. Our objectives were to enhance understanding of karst forest ecology and methods of controlling loss of soil and water as a means of managing karst desertification.

Methods For five years, we observed karst natural forest and secondary natural forest in 20 m × 20 m plots and analyzed major precipitation ions by ion chromatography. Main indicators were analyzed by Forest Soil Analyzed Methods and observed by Meteorological Observational at Ground Standards.

Important findings Rankings of annual precipitation value regularity were openland > outside karst forest > inside karst forest > under tree and herbaceous layer > runoff at surface and in 90 cm soil > stemflow, and transpiration at forestland and another > total interception in arbuscular and herbaceous layer > total in-

terception in arboreal layer. Annual dynamics of these variables were higher in summer and lower in winter. Maximum water holding capacity ranked soil layer > vegetation, and that in arboreal layer > litter layer > tree layer > herbaceous layer. Ion contents in precipitation had obvious month regularity and decreased in spring and increased in autumn and were high in winter and low in summer. Along precipitation flows (outside forest → in forest → surface runoff → runoff in soil → stream), eight ions were divided into three types: a sustainable rich type included Ca^{2+} and Mg^{2+} ; a surface rich type included K^+ , Na^+ , Cl^- , NO_3^- and NH_4^+ ; and another type included SO_4^{2-} . Ions input by precipitation, output by runoff and retained in karst natural forest were higher than that in karst secondary natural forest.

Key words karst natural forest, karst secondary natural forest, hydrological process, nutrient dynamics

喀斯特(Karst)是一种自然现象,主要指水对碳酸岩溶蚀的地球化学过程和形成的地貌形态,一般具有石质、无水、无林和地表崎岖的基本特征(刘映良 2005)。在湿润的森林气候背景下,喀斯特地貌上发育的森林泛称为喀斯特森林(周政贤,1987;朱守谦,1997)。喀斯特地质地貌特性有别于其它地貌类型,对其上发育的土壤和生长的森林有深刻的影响。以贵州为中心的我国西南部、地中海沿岸和美国东部是世界三大喀斯特地貌的集中分布区。黔中山地降水量丰富,但降水的季节性分配不均。气候干旱常与土壤干旱交织在一起,以频繁的土壤干旱为表症。水是当地植被恢复的主要限制因素之一。喀斯特母岩成土缓慢(韦启番,1996)剖面发育不全,土壤容量小、主要营养元素承载量少,森林生产力低,生态系统脆弱。研究喀斯特森林的水文学过程和养分动态,既可丰富喀斯特森林生态学的内容,又可为控制水土流失和治理石漠化提供理论依据。

现代森林水文研究始于 20 世纪初(余新晓等, 2004)。目前研究主要包括林冠截留(Dunkerley, 2000;Henderson *et al.*, 1977;Oyarzún *et al.*, 1998; Putuhena & Cordery, 1996;Viville, 1993;冉顶丞等, 2003)地表径流(Bonell,1993;Dunne,1991;Gupta & Mesa,1988;Peter,1995;梅再美和熊康宁,2003)树干径流(Nearby & Gizyn,1994;Parker,1983)林地蒸散(Thornthwaite,1948;Hargreaves & Samani,1982;Kelliher,1989;Schaap & Bouten,1997)和小流域水文循环(Henny,1999;Stednick,1996;刘世荣等,1996;金小麒,2000)等。本文则通过对典型的喀斯特森林类型的多年定位观测研究,分析降水和随降水流动的主要养分子在森林内外的变化特征,研究喀斯特森林对降水分配和随降水流动的主要养分子动态的影响。

1 试验区概况

本试验在贵州喀斯特生态站开阳试验区(106°

45' ~ 107°17' E、26°48' ~ 27°22' N)进行。该区所属的黔中鱼梁河流域是乌江的支流,流域为 1 034 km²,处于扬子准地台、遵义断拱、贵阳复杂变形区,主要地质构造属东北走向的都拉营复式向斜和水田坝复式背斜,与白马断裂带、炮打岩断裂带和马场断裂带构成区内主要地貌架构。流域大部分出露地层以古生代为主,是典型的复合喀斯特地貌区。试验区海拔 506.5 ~ 1 702 m,年平均气温 10.6 ~ 15.3 °C、年降水量 962.5 ~ 1 419.5 mm,≥ 10 °C 年积温 1 562.7 ~ 2 278.2 °C,日照时数 898.1 ~ 1084.8 h,无霜期 224 ~ 295 d,主要森林植被类型为中亚热带非地带性喀斯特常绿落叶阔叶混交林和地带性常绿阔叶林。

2 研究方法

在试验区森林勾绘与调查的基础上,选择有代表性、保存较好的原生和次生喀斯特森林类型各一个。

喀斯特原生林(表 1、表 2)林班面积为 2.1 hm²,坡度为 25°,坡位中下部,坡向东北,岩石裸露率为 5%。乔木层、灌木层和草本层盖度分别为 95%、40%和 37%,林分密度为 1 425 株·hm⁻²,地表枯落物量为 22.08 Mg·hm⁻²,成土母岩为灰岩、黑色石灰土。乔木层主要原生树种有香樟(*Cinnamomum camphora*)、青冈(*Cyclobalanopsis* sp.)、栲(*Castanopsis* sp.)、榆树(*Ulmus pumila*)、朴(*Celtis* sp.)、冬青(*Ilex* sp.)、化香(*Platycarya* sp.)等,株数占 80.00%;次生树种有枫香(*Liquidambar formosana*)、杨梅(*Myrica rubra*)等,株数占 20.00%。落叶和常绿树种株数分别占 60.03%和 39.97%。灌木层主要有山矾(*Symplocos* sp.)、香樟、刺楸(*Kalopanax septemlobus*)、胡颓子(*Elaeagnus* sp.)、灯台(*Cornus* sp.)、冬青、榆树和枫香等;草本层主要有节节草(*Hippochaete* sp.)、楼梯草(*Elatostema* sp.)和蕨(*Pteridium* sp.)等。

喀斯特次生林林班面积为 2.3 hm²,坡度为 15°,

表 1 不同喀斯特森林类型样地林分 and 植物多样性特征
Table 1 Basic parameters of stands and diversity in different types of karst forests

样地号 Plot No.	层片 Layers	林分特征指数 Stand indexes			多样性指数 Diversity indexes		
		高度 Height (m)	直径 Diameter* (cm)	生物量 Biomass (Mg·hm ⁻²)	Menhinnick 指数 Menhinnick index	Simpson 指数 Simpson index	Pielou 指数 Pielou index
No. 1	乔木层 Arboreous layer	9.92	14.17	25.67	0.593 1	0.204 1	0.782 2
	灌木层 Arbuscular layer	0.66	0.49	2.38	0.551 4	0.302 8	1.132 9
	草本层 Herbaceous layer	0.12		0.49	0.453 1	0.341 9	0.665 6
No. 2	乔木层 Arboreous layer	5.16	7.39	11.24	0.599 8	0.172 6	0.824 3
	灌木层 Arbuscular layer	0.61	0.49	1.58	0.605 9	0.139 1	0.829 7
	草本层 Herbaceous layer	0.15		0.23	0.492 8	0.249 4	0.745 3

No. 1 : 喀斯特原生林 Karst natural forest No. 2 : 喀斯特次生林 Karst secondary natural forest * 乔木层指胸径 , 灌木层指地径 Diameter at breast height (DBH) for tree or diameter on the ground for shrub

表 2 试验林样地土壤主要性质
Table 2 Main soil characteristics of the experimental types of karst forest

	项目 Item	No. 1	No. 2
A 层 A stratum	厚度 Thickness (cm)	9.0	13.0
	容重 Volume weight (g·cm ⁻³)	0.849 0	0.960 2
	总孔隙度 Total pore (%)	56.42	56.11
	毛管孔隙度 Capillary pore (%)	50.93	43.77
B 层 B stratum	厚度 Thickness (cm)	22.0	10.0
	容重 Volume weight (g·cm ⁻³)	1.548 2	1.237 1
	总孔隙度 Total pore (%)	42.36	61.44
	毛管孔隙度 Capillary pore (%)	41.03	60.42
C 层 C stratum	厚度 Thickness (cm)	89.0	127.0
	容重 Volume weight (g·cm ⁻³)	1.530 8	1.345 9
	总孔隙度 Total pore (%)	46.64	54.12
	毛管孔隙度 Capillary pore (%)	45.31	49.03

No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1

坡位中下部 , 坡向东 , 岩石裸露率为 3%。乔木层、灌木层和草本层盖度分别为 60%、50% 和 16% , 林分密度为 1 575 株·hm⁻² , 地表枯落物量为 20.48 Mg·hm⁻² , 成土母岩为灰岩 , 黄色石灰土。乔木层主要次生树种有青冈、漆树(*Toxicodendron verniciflum*)、香叶树(*Lindera communis*)、栲、山矾、枫香、灯台等 , 株数占 84.13% ; 其它树种有杨(*Populus* sp.)、桦(*Betula* sp.)、马尾松(*Pinus massoniana*)等 , 株数占 15.87%。落叶和常绿树种株数分别占 87.30% 和 12.70%。灌木层主要有香叶树、白栎、女贞、花椒(*Sorbus* sp.)、枫香、杨、算盘子、山矾、桦、茅栗(*Castanea* sp.)等 ; 草本层主要有翠云草(*Selaginella* sp.)、毛茛(*Ranunculus* sp.)、冷水花(*Pilea* sp.)、竹叶草(*Oplismenus* sp.)、筒轴茅(*Rottboellia* sp.)和蕨等。

在两片试验林内 , 选择林相整齐、土层覆被相对完整、无岩石裂缝和漏水现象的地段 , 设置 20 m × 20 m 固定样地。样地内设 3 个 3 m × 3 m 灌木样地、1 m × 1 m 草本和枯枝落叶样地。乔木和灌木层按物种测定胸(地)径和高度 , 用模型推算生物量

(冯宗炜等 ,1999 ; 喻理飞等 ,2002) ; 草本层按物种统计株数和平均高度 , 草本层和枯落物层用收获法测定生物量。样地内设置 3 个土壤取样点 , 分层取样 , 相关指标分析见林业行业标准(国家林业局 ,1999)。

沿固定样地左右和上部边界人工外挖至母岩层 , 开一个 10 cm 宽的槽 , 槽内装填隔水材料玻纤布 2~3 层 , 用水泥和砖砌的隔水墙高出地面 15~20 cm , 墙顶斜面向外倾斜 45° , 在下部边界断面离地表 30、60 和 90 cm 处 , 埋设宽 1 m、横向深入土壤 0.5 m 的挡水塑料板 , 建立溢水口 , 不同层溢水口互相错开 , 共 3 对 , 收集壤中流。在样地每木检尺基础上 , 分不同径阶选择有代表性的树种 4~5 株 , 用塑料导管和集水器收集树干径流。样地内按乔木层郁蔽度等级在不同位置放置 3 个普通雨量筒收集林内降水 , 距林班下部林隙 20~30 m 处放置 1 个普通雨量筒收集林隙降水 , 设置和观测方法见地面气象观测规范(中央气象局 ,1979)。样地内按灌草层盖度等级在不同位置沿地表等高线设置 4~6 个集水器收集灌草层降水。集水器宽 10 cm、长 1 m。样地下部边界等高处建立 2 个相连的 1 m³ 集水池收集地表径流。降水时段的每日早 8 时、晚 8 时监测水量。在相同林分的 2 个固定样地外侧 , 建立林内雨量点 2 个 , 相近坡向和海拔高度的空旷地建雨量点 1 个 (表 3、图 1) , 雨量点设置和观测方法见地面气象观测规范(中央气象局 ,1979)。研究时间从 2001 年到 2005 年。

以周为间隔 , 分别收集样地集水区溪流水 , 林内、林隙降水 , 树干径流 , 地表径流和 90 cm 壤中流 , 带回实验室内 , 用原子吸收光谱仪测定 NO₃⁻、NH₄⁺、SO₄⁻、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 和 Na⁺。采样时间为 1 年。

在样地调查的基础上 , 选择乔木和灌木层优势种(组)的标准枝 , 称取鲜重 ; 草本和枯枝落叶层按 3

表 3 雨量点的空间分布参数
Table 3 Spatial distribution parameters of precipitation observation sites

	海拔高度 Altitude (m)				水平距离 Horizontal distance (m)		
	观测面 Observation of valley	峡谷对面 Opposite of valley	雨量点 Precipitation observation site	谷底 Valley bottom	峡谷顶间 Two tops of valley	观测点至峡谷轴线 From observation site to valley axis	观测点距离 Observation site distance
No. 1	1 384.7	1 244.0	1 266.6	968.6	2 100.0	490.0	1 300.0
No. 2	1 332.8	1 276.0	1 178.9	1 033.9	1 700.0	370.0	1 050.0
CK	1 331.0	1 383.0	1 162.0	1 071.7	1 600.0	555.0	1 050.0

CK : 对照 Control No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1

图 1 观测点分布图
Fig.1 Distribution map of observation sites
CK : 对照 Control No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1

个 1 m × 1 m 样方混合取样 称取湿重。所取样品放入水中浸泡 1 h 后 取出 待重力水滴净后称重 , 据此计算烘干重为基础的最大持水率(金小麒 , 2000)。

乔木层和灌木层按优势种(组) 的标准株选择叶、枝、茎取样 ; 草本和枯枝落叶层混合取样。离子浓度测定方法 : 全 N 用凯氏法 , 全 P 用酸溶-钼锑抗比色法 , 全 K 用氢氟酸-高氯酸消煮后火焰光度法 , Ca 和 Mg 用干灰化 EDTA 容量法(鲁如坤 , 2000)。

3 结果与分析

3.1 不同喀斯特森林类型降水量动态

3.1.1 林内外降水量月动态及其相互关系

黔中山地春、夏、秋、冬四季降水量的比例分别为 27.90%、46.61%、14.21%、11.28% , 主要集中在

春、夏季(占全年降水量的 74.51%)。空旷地和不同喀斯特森林类型的林隙、林内月降水量有数量上的差异。喀斯特原生林和喀斯特次生林年降水量的变化趋势相似 : 林内 < 林隙 < 空旷地 , 比例为 0.92:0.94:1.00(表 4) , 符合林内外降水量变化的一般规律(刘世荣等 , 1996 ; 余新晓等 , 2004)。但林内外降水量的月变化中 , 喀斯特原生林林内降水量大于林隙降水量的月数占 41.67%、大于空旷地降水量的月数占 25.00% ; 喀斯特次生林林内降水量大于林隙降水量的月数占 50.00%、大于空旷地降水量的月数占 16.67% , 这又反映了黔中山地喀斯特森林和降水量关系的特殊性。大气环流和植被结构的年动态变化是影响林内外月降水量变化差异的主要因素。春季 , 太平洋暖湿气流和控制黔中山地的北方冷空气频繁交汇 , 逐渐以暖湿气流为主导 , 降水

量增大,样地落叶树种逐渐长出新叶,原生或次生喀斯特森林的林内降水量高于林隙和空旷地;由于森林增加了地表的粗糙度,林隙和林内降水量高于空旷地。夏季,森林的覆盖度和生物量较高,林内雨后的“冠层降水”量较大,林内降水量高于林隙和空旷地的降水量。秋季,冷、暖空气再次在黔中山地交汇,并以干冷空气为主导,降水量逐渐减少,但初秋由于森林“下垫面”作用,林隙降水量高于空旷地。值得一提的是,喀斯特次生林在 12 月至翌年 2 月的林内降水量略高于林隙,这主要是因为峡谷内气温高、蒸发量大,在林冠层形成雾、霜、露的凝结降水所致。结合表 3 和图 1 分析,虽然空旷地、喀斯特原生林和次生林雨量点位于同一峡谷的相近坡面、坡向、坡位和海拔高度,但喀斯特原生林位于两个河谷的交

汇处,受峡谷内、外气流的综合影响,总降水量较大;喀斯特次生林主要受峡谷气流影响,总降水量较小;空旷地雨量点由于缺少森林的作用,总降水量最大。

3.1.2 林内不同层次降水量月动态及其相互关系

喀斯特原生林(表 5)的灌草层降水、净地表径流和 90 cm 壤中流占空旷地降水量的比例分别为 57.85%、0.31% 和 1.76%;喀斯特次生林的相应项分别为 42.73%、1.81% 和 0.30%。喀斯特原生林内地表径流产生于 4~10 月,壤中流产生于 5~9 月,喀斯特次生林内除 12 月外,其余各月均有地表径流产生,壤中流产生于 5~7 月。这与黑色石灰土和黄色石灰土的特性差异和两种喀斯特森林类型的林分特征变化有关。喀斯特原生林地上部分生物量为喀斯特次生林的 2.19 倍,有效地减少了林地表面

表 4 不同喀斯特森林类型林内外降水量月动态
Table 4 Monthly variations of precipitation of gap and inner in different types of karst forests (mm)

月份 Month	No. 1		No. 2		CK
	林隙	林内	林隙	林内	无林地
	Forest gap	Inner forest	Forest gap	Inner forest	Non-forested land
1 月 Jan.	31.00	16.80	35.00	42.70	39.35
2 月 Feb.	31.10	24.20	25.15	25.40	38.75
3 月 Mar.	43.10	33.80	27.95	26.50	44.95
4 月 Apr.	54.25	39.50	51.80	24.60	61.65
5 月 May	203.93	231.87	192.30	206.10	184.60
6 月 Jun.	130.50	127.10	155.63	118.13	149.57
7 月 Jul.	204.27	223.27	214.23	236.07	225.47
8 月 Aug.	106.30	110.83	99.97	92.77	111.43
9 月 Sept.	46.90	49.27	46.97	41.93	42.57
10 月 Oct.	75.20	57.07	66.27	67.57	75.83
11 月 Nov.	26.13	25.27	22.17	21.67	29.90
12 月 Dec.	43.75	50.25	27.25	28.65	39.60

CK:对照 Control No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1

表 5 不同喀斯特森林类型林内不同层次降水量月动态
Table 5 Monthly variations of precipitation in different layers of karst forest (mm)

月份 Month	No. 1			No. 2		
	①	②	③	①	②	③
1 月 Jan.	37.56	0.00	0.00	14.12	0.22	0.00
2 月 Feb.	21.31	0.00	0.00	10.90	0.25	0.00
3 月 Mar.	22.60	0.00	0.00	19.40	0.04	0.00
4 月 Apr.	40.60	0.02	0.00	26.77	0.25	0.00
5 月 May	114.82	0.11	4.23	75.10	2.75	0.21
6 月 Jun.	73.09	0.02	4.05	61.66	1.57	0.15
7 月 Jul.	122.43	1.48	7.53	113.68	8.69	2.74
8 月 Aug.	57.01	1.16	2.44	44.34	2.98	0.00
9 月 Sept.	23.03	0.39	0.15	21.35	0.87	0.00
10 月 Oct.	38.96	0.01	0.00	36.48	0.87	0.00
11 月 Nov.	18.09	0.00	0.00	14.24	0.42	0.00
12 月 Dec.	34.31	0.00	0.00	7.95	0.00	0.00

No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1 ① 灌草层降水量 Precipitation from arbuscular and herbaceous layers ② 净地表径流量 Net soil surface runoff ③ 90 cm 壤中流量 Soil runoff in 90 cm

的降水强度。生物量高、截留量大,雨后“冠层降水”潜力大,兼有风的作用,林内降水的时间和数量增加,有助于壤中流形成。喀斯特原生林表层土壤容重为喀斯特次生林的 88.42%、总孔隙度为 100.55%、毛管孔隙度为 116.36%,有利于地表水流下渗。喀斯特原生林枯落物量为喀斯特次生林的 107.83%,其土壤表层有机质含量为 147.30%,有利于蓄留地表径流。因此,尽管喀斯特原生林的坡度大于喀斯特次生林,但 90 cm 壤中流量为喀斯特次

生林的 591.63%,地表径流量仅有 16.92%。

3.1.3 不同树种与径级的径流量月动态及其相互关系

不同树种与径级径流量变化规律为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。径流量变幅为 1.52 ~ 15.06 mm·a⁻¹,占空旷地降水量的 0.15% ~ 1.07%(表 6)。树干径流量与平均胸径呈正相关,相关性不显著,基本趋势是常绿阔叶树种 > 落叶阔叶树种 > 常绿针叶树种。

表 6 不同树种与径级径流量月动态

Table 6 Monthly variations of stemflow in different diameters at breast height (DBH) of several trees in different types of karst forests (mm)

项目 Item	杨树 <i>Populus</i> sp.		马尾松 <i>Pinus massoniana</i>		枫香 <i>Liquidambar formosana</i>		冬青 <i>Ilex</i> sp.		香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>
DBH (cm)	24.2	12.3	17.9	3.5	9.6	9.8	29.3	14.6	14.1
1 月 Jan.	0.09	0.02	0.06	0.02	0.23	0.31	0.52	0.15	0.27
2 月 Feb.	0.07	0.01	0.09	0.02	0.06	0.07	0.59	0.09	0.06
3 月 Mar.	0.24	0.02	0.03	0.04	0.25	0.12	1.20	0.07	0.15
4 月 Apr.	0.25	0.03	0.16	0.03	0.15	0.46	0.69	0.05	0.18
5 月 May	0.89	0.29	0.52	0.24	1.12	0.98	1.90	0.69	1.88
6 月 Jun.	0.60	0.30	0.44	0.17	0.64	0.63	1.82	0.87	2.04
7 月 Jul.	1.72	0.49	0.93	0.69	1.31	1.11	2.59	2.22	4.28
8 月 Aug.	0.71	0.16	0.18	0.17	0.85	0.72	1.65	0.51	1.18
9 月 Sept.	0.27	0.08	0.09	0.06	0.42	0.32	0.65	0.32	1.13
10 月 Oct.	0.36	0.09	0.16	0.02	0.66	0.69	2.74	0.39	0.96
11 月 Nov.	0.08	0.03	0.03	0.01	0.32	0.33	0.51	0.07	0.27
12 月 Dec.	0.04	0.01	0.07	0.05	0.18	0.30	0.21	0.15	0.37

3.1.4 降水在喀斯特森林“输入-输出”的分量月动态及其相互关系

喀斯特原生林(表 7)冠层降水截留总量为空地降水量的 4.27%,灌草层降水截留总量为 36.93%,地表蒸发等量为 56.73%,净地表径流和 90 cm 壤中流量为 2.07%;喀斯特次生林的相应项分别为 10.36%、46.58%、40.95%和 2.11%。喀斯特原生林的灌草层降水截留总量、90 cm 壤中流量、林地蒸发等量的季节变化趋势为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,净地表径流量的季节变化趋势为:夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,林冠层降水截留总量为:冬季 > 夏季 > 秋季 > 春季,喀斯特次生林的净地表径流量、林地蒸发等量的季节变化趋势为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,林冠层降水截留总量、灌草层降水截留总量的季节变化趋势为:夏季 > 春季 > 冬季 > 秋季,90 cm 壤中流量的季节变化趋势为:夏季 > 春季 > 秋季、冬季。造成不同喀斯特森林类型对降水分配的季节变化差异与近地气流、样地位置和林分特征有关。

结合林分特征(表 1)分析,喀斯特原生林冠层实际截留总量小于喀斯特次生林,这与以往的“生物量高的林分截留量大”结论不一致(刘世荣等,1996;余新晓等,2004)。我们推测,这与植被层的层片盖度、高度和生物量密度有关,也与地形、风向和风量密切相关。喀斯特原生林的平均高度为喀斯特次生林的 192.25%,受河谷和峡谷风的影响,林内穿透风量大、风向多变,雨后“冠层降水”量较大,实际截留总量较小,喀斯特次生林的平均高度较低,风向单一,实际截留总量较大。喀斯特原生林地表枯落物层厚,土壤容重低、孔隙度高,林内风量大,林地蒸发量高于喀斯特次生林。不同喀斯特森林乔木层的盖度、生物量均高于灌草层,但截留总量较小,这主要与黔中山地降水量相对集中有关,当林冠层降水截留量达到最大值后,大气降水主要以林内降水形式进入灌草层;其次与林冠层作为森林与其它系统的界面有关,如较强的风量增加了雨后“冠层降水”和冠层蒸发蒸腾能力,也与乔木层的树种组成有关,其

落叶树种占 60.03% ~ 87.30% ,直接影响了不同季节的降水截留。

3.2 不同喀斯特森林类型降水相关离子量动态

3.2.1 林隙降水中相关离子月均浓度动态及相互关系

所测试离子在林隙降水中的月平均浓度的整体变化趋势是夏季较低,冬季较高(表 8) ,Na⁺ 的趋势性较弱。在秋末到初春之间,不同离子浓度值波动大,有一至多个峰值。按变化趋势可划分为:12 月峰值型(包括 SO₄²⁻、Ca²⁺、K⁺、Na⁺、NH₄⁺、NO₃⁻ 离子) 1 月峰值型(包括 Mg²⁺、Cl⁻ 离子) 2 月峰值型(包括 SO₄²⁻、Ca²⁺、NH₄⁺ 离子)和 3 月峰值型(包括

Na⁺、NO₃⁻ 离子)。

喀斯特森林林隙降水中,相关离子浓度年平均值排序为:SO₄²⁻ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > NH₄⁺ > K⁺ > NO₃⁻ > Cl⁻ > Na⁺ ,相应离子浓度值为 0.383、0.262、0.087、0.075、0.050、0.036、0.034 和 0.019 mmol·L⁻¹。喀斯特原生林的相应离子浓度值为:0.356、0.276、0.095、0.080、0.052、0.045、0.051 和 0.029 mmol·L⁻¹;喀斯特次生林的相应离子浓度值为 0.292、0.180、0.060、0.057、0.038、0.020、0.015 和 0.012 mmol·L⁻¹ ,喀斯特原生林林隙降水中相应离子浓度值高于喀斯特次生林。

表 7 不同喀斯特森林类型降水量收支平衡表
Table 7 Hydrological balance of precipitation in experimental types of karst forest (mm)

	No. 1					No. 2				
	①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤
1 月 Jan.	22.24	- 20.76	0.00	0.00	38.87	- 3.43	28.58	0.22	0.00	13.98
2 月 Feb.	14.35	2.89	0.00	0.00	21.51	13.30	14.50	0.25	0.00	10.70
3 月 Mar.	10.77	11.20	0.00	0.00	22.98	18.33	7.10	0.04	0.00	19.48
4 月 Apr.	21.81	- 1.10	0.02	0.00	40.92	36.93	- 2.17	0.25	0.00	26.64
5 月 May	- 48.63	117.05	0.11	4.23	111.84	- 22.11	131.00	2.75	0.21	72.75
6 月 Jun.	21.13	54.01	0.02	4.05	70.36	31.01	56.47	1.57	0.15	60.37
7 月 Jul.	- 0.35	100.84	1.48	7.53	115.97	- 11.63	122.39	8.69	2.74	103.28
8 月 Aug.	- 0.41	53.82	1.16	2.44	54.42	18.25	48.43	2.98	0.00	41.77
9 月 Sept.	- 7.30	26.24	0.39	0.15	23.09	0.46	20.58	0.87	0.00	20.66
10 月 Oct.	17.57	18.11	0.01	0.00	40.14	8.00	31.09	0.87	0.00	35.87
11 月 Nov.	4.33	7.18	0.00	0.00	18.39	8.13	7.43	0.42	0.00	13.92
12 月 Dec.	- 10.91	15.94	0.00	0.00	34.57	10.88	20.7	0.00	0.00	8.02

No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1 ①:林冠层截留总量 = 林外降水量 - 林内降水量 - 树干径流量,包括林冠层净截留量和蒸腾量 Total interception in arboreous layer = precipitation - throughfall - stemflow , including net interception and transpiration in arboreous layer ②:灌草层截留总量 = 林内降水量 - 灌草层降水量,包括灌草层净截留量和蒸腾量 Total interception in arbuscular and herbaceous layer = throughfall - precipitation under arbuscular and herbaceous layer , including net interception and transpiration in arbuscular and herbaceous layers ③:净地表径流量 Net soil surface runoff ④:90 cm 壤中流量 Soil runoff in 90 cm ⑤:林地蒸发量等 Forest land surface evaporation and so on

表 8 喀斯特森林林隙降水中相关离子月平均浓度动态
Table 8 Monthly variations of relative ion mean contents of forest-gap precipitation in karst forest (mmol·L⁻¹)

月份 Month	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
1 月 Jan.	0.267	0.236	0.051	0.018	0.089	0.426	0.047	0.133
2 月 Feb.	0.784	0.191	0.051	0.029	0.169	1.190	0.080	0.051
3 月 Mar.	0.448	0.092	0.051	0.045	0.070	0.495	0.119	0.039
4 月 Apr.	0.208	0.061	0.034	0.010	0.079	0.291	0.049	0.013
5 月 May	0.118	0.038	0.038	0.005	0.022	0.138	0.014	0.009
6 月 Jun.	0.077	0.024	0.032	0.004	0.030	0.138	0.007	0.005
7 月 Jul.	0.090	0.030	0.045	0.030	0.042	0.122	0.009	0.027
8 月 Aug.	0.155	0.044	0.028	0.017	0.039	0.188	0.015	0.016
9 月 Sept.	0.101	0.037	0.031	0.012	0.042	0.192	0.009	0.012
10 月 Oct.	0.155	0.044	0.043	0.012	0.152	0.433	0.042	0.017
11 月 Nov.	0.281	0.093	0.082	0.014	0.040	0.417	0.008	0.054
12 月 Dec.	0.460	0.156	0.116	0.036	0.129	0.571	0.034	0.037

3.2.2 林内降水中相关离子月平均浓度动态及其相互关系

所测试离子在林内降水中的月平均浓度动态(表 9)的整体变化趋势除 Na^+ 、 NH_4^+ 的趋势性较弱外,其余离子浓度的变化趋势与林隙降水相似,春季逐渐降低、夏季较低、秋季逐渐升高。秋末到初春之间,相关离子浓度峰值波动的时间较林隙降水长,这与林冠层对林内降水中相关离子的“稀释”和“积累”作用有关。

喀斯特森林林内降水中相关离子浓度年平均值的排序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+$,相应离子浓度分别为:0.761、0.562、0.167、0.129、0.089、0.049、0.036 和 0.014 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,林内降水中相应离子浓度值高于林隙降水。喀斯特原生林内相应离子浓度值为:0.820、0.635、0.183、0.109、0.115、0.055、0.045 和 0.016

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$;喀斯特次生林内相应离子浓度值为:0.544、0.385、0.130、0.102、0.065、0.030、0.022 和 0.011 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,喀斯特原生林林内降水中相应离子浓度值高于喀斯特次生林。

3.2.3 树干径流中相关离子月平均浓度动态及其相互关系

在固定样地中,榆树、枫香、香樟、白栎和马尾松树干径流中相关离子月平均浓度动态除 Na^+ 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 的趋势性较弱外,其余离子浓度变化趋势类似于林隙和林内降水。但秋、冬、春三季之间相关离子浓度值的波动时间长于林隙和林内降水,这主要受不同树种特性的影响。

不同树种相关离子年平均浓度值排序为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+$ (表 10)相应离子浓度分别为:3.512、2.410、0.851、0.384、0.115、0.107、0.033 和 0.023 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,同林

表 9 喀斯特森林林内降水中相关离子月平均浓度动态
Table 9 Monthly variations of relative ion mean contents of inner forest precipitation in karst forest ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)

月份 Month	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
1 月 Jan.	0.753	0.165	0.128	0.012	0.084	1.041	0.061	0.032
2 月 Feb.	0.859	0.186	0.128	0.017	0.114	1.184	0.085	0.033
3 月 Mar.	0.727	0.149	0.128	0.038	0.133	0.822	0.100	0.048
4 月 Apr.	0.340	0.107	0.087	0.013	0.106	0.494	0.035	0.026
5 月 May	0.158	0.067	0.054	0.007	0.053	0.221	0.019	0.013
6 月 Jun.	0.138	0.073	0.070	0.007	0.090	0.258	0.015	0.012
7 月 Jul.	0.169	0.061	0.083	0.007	0.108	0.241	0.017	0.011
8 月 Aug.	0.280	0.106	0.064	0.007	0.050	0.375	0.020	0.012
9 月 Sept.	0.518	0.171	0.113	0.008	0.056	0.670	0.048	0.021
10 月 Oct.	0.565	0.193	0.170	0.013	0.111	0.919	0.053	0.035
11 月 Nov.	1.148	0.388	0.304	0.019	0.062	1.574	0.091	0.076
12 月 Dec.	1.093	0.342	0.218	0.020	0.099	1.330	0.042	0.110

表 10 不同树种树干径流中相关离子月平均浓度动态
Table 10 Monthly variations of relative ion mean contents in the stemflow of several trees in karst forest ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)

月份 Month	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	NH_4^+	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
1 月 Jan.	4.775	2.024	0.319	0.045	0.063	7.462	0.046	0.186
2 月 Feb.	5.485	2.079	0.319	0.053	0.061	8.377	0.005	0.213
3 月 Mar.	3.935	1.156	0.319	0.048	0.177	5.128	0.129	0.195
4 月 Apr.	2.430	0.625	0.400	0.020	0.102	3.535	0.023	0.095
5 月 May	0.980	0.233	0.200	0.008	0.111	1.149	0.039	0.043
6 月 Jun.	0.647	0.208	0.248	0.006	0.279	1.007	0.030	0.043
7 月 Jul.	0.631	0.198	0.221	0.005	0.132	0.938	0.024	0.043
8 月 Aug.	0.724	0.192	0.171	0.005	0.060	0.861	0.010	0.032
9 月 Sept.	1.709	0.707	0.469	0.019	0.163	2.227	0.039	0.108
10 月 Oct.	1.295	0.470	0.409	0.013	0.089	1.996	0.025	0.079
11 月 Nov.	2.476	0.793	0.696	0.018	0.065	3.772	0.005	0.107
12 月 Dec.	3.814	1.529	0.794	0.030	0.078	5.693	0.021	0.143

隙和林内降水中相关离子浓度比较,NO₃⁻ 浓度降低,其余离子浓度均升高。所测试树种间相应离子浓度值变幅为:2.179 ~ 4.492、1.481 ~ 3.492、0.311 ~ 1.763、0.237 ~ 0.798、0.059 ~ 0.436、0.041 ~ 0.246、0.003 ~ 0.158 和 0.014 ~ 0.025 mmol·L⁻¹。

3.2.4 溪流水中相关离子月平均浓度动态及相互关系

固定样地溪流水中相关离子月平均浓度(表 11)动态除 Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻ 的波动幅度大、频率高外,其余离子浓度变化平缓、无明显规律性,与林隙

和林内降水以及树干径流的离子浓度变化趋势不同。

固定样地集水区上、下段溪流水中相关离子年平均浓度值排序为:Mg²⁺ > Ca²⁺ > SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻ > Na⁺ > K⁺ > NH₄⁺,相应浓度值分别为:2.912、2.482、0.384、0.087、0.026、0.023、0.013 和 0.001 mmol·L⁻¹。相应离子年平均浓度值在溪流水上、下段的变幅为:2.940 ~ 3.100、2.521 ~ 2.543、0.337 ~ 0.465、0.081 ~ 0.088、0.021 ~ 0.031、0.021 ~ 0.027、0.007 ~ 0.010 和 0.001 ~ 0.002 mmol·L⁻¹。

表 11 固定样地集水区溪流上、下段水相关离子月平均浓度动态
Table 11 Monthly variations of relative ion mean contents of upper and lower stream (mmol·L⁻¹)

月份 Month	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
1 月 Jan.	1.678	1.895	0.014	0.011	0.000	0.230	0.052	0.010
2 月 Feb.	2.799	3.130	0.014	0.024	0.000	0.328	0.102	0.016
3 月 Mar.	2.566	3.109	0.014	0.016	0.000	0.234	0.126	0.018
4 月 Apr.	2.454	2.629	0.015	0.015	0.000	0.318	0.097	0.020
5 月 May	2.257	2.368	0.025	0.028	0.001	0.609	0.084	0.060
6 月 Jun.	2.532	2.626	0.017	0.036	0.003	0.552	0.094	0.053
7 月 Jul.	2.730	3.118	0.032	0.024	0.004	0.478	0.094	0.031
8 月 Aug.	2.946	3.554	0.013	0.028	0.003	0.468	0.105	0.034
9 月 Sept.	2.190	3.160	0.002	0.023	0.001	0.342	0.065	0.017
10 月 Oct.	2.706	3.298	0.000	0.027	0.005	0.382	0.070	0.018
11 月 Nov.	2.378	3.125	0.000	0.021	0.000	0.340	0.075	0.018
12 月 Dec.	2.546	2.927	0.004	0.020	0.000	0.324	0.078	0.017

3.2.5 随降水流动的相关离子量

随降水流动的相关离子总量(Nw , kg·hm⁻²):

$$Nw = 10^{-2} \times \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Cmn \times Pmn \times Bmn \times Dmn \quad (1)$$

式中, Cmn 为降水分量中相关离子浓度月平均值 (mmol·L⁻¹); Pmn 为降水分量月平均值 (mm); Bmn 为离子中目标元素的分子量比例 (%); Dmn 为离子分子量; M 为月数; N 为所测试养分离子数,包括 NO₃⁻、NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、Na⁺。

喀斯特原生林(表 12)年随降水增加的相关离子量为 430.951 kg·hm⁻²·a⁻¹,经林冠层淋洗后林内降水中相关离子量为 835.604 kg·hm⁻²·a⁻¹、增加 1.94 倍,随地表径流和 90 cm 壤中流的输出量为 49.789 kg·hm⁻²·a⁻¹,随降水净增的相关离子量为 381.162 kg·hm⁻²·a⁻¹,喀斯特次生林的相应项分别为 304.101、511.559、1.68、39.216 和 264.885 kg·hm⁻²·a⁻¹。相关离子的输入-输出量较其它森林类型高,但变化趋势相似(刘世荣等,1996;Henderson *et al.*, 1977; Neary & Gizyn, 1994; Oyarzún *et al.*,

1998)。其中,SO₄²⁻ 的高量输入-输出受该地酸雨的影响。

3.3 不同喀斯特森林类型最大持水量和相关离子储量

3.3.1 最大持水量

最大持水量包括植被和土壤两部分。
植被层最大持水量(Wp , mm):

$$Wp = 0.1 \times \sum_{i=1}^I Whi \times Wbi \quad (2)$$

式中, Whi 为乔木或灌木层中优势种(组)标准枝叶最大持水率(%),草本或枯枝落叶层为混合样品最大持水率(%); Wbi 为乔木层相应优势种(组)枝叶量、灌木层和草本层为地上部分生物量 (Mg·hm⁻²); I 为乔木或灌木层优势种(组)数,草本或枯落物层的 I 值为 1。

土壤层最大持水量(Wsj , mm):

$$Wsj = 10^{-6} \times Hj \times Vj \times (100 - Mj) \times (100 - Rj) \times (Wj - 1000) \quad (3)$$

式中, Hj 为土层厚度 (cm); Vj 为土层容重 (g·

cm^{-3}); M_j 为土层石砾含量(%); R_j 为土层根量(%); W_j 为土层最大持水量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土壤层最大持水量加权值($W_s, \text{mm} \cdot (3 \text{ cm})^{-1}$):

$$W_s = \sum_{j=1}^J W_{sj} / H_j \tag{4}$$

式中, J 为土层数, $J = 3$; W_{sj} 为土壤层最大持水量(mm); H_j 为土层厚度(cm)

喀斯特原生林(表 13)植被层地上部分最大持水量为 28.20 mm,是喀斯特次生林的 194.48%。植

被层地上部分最大持水量的变化趋势为乔木层 > 枯落物层 > 灌木层 > 草本层。喀斯特原生林土壤层最大持水量为 697.12 mm,是喀斯特次生林的 206.72% ;土壤层最大持水量的加权值为 19.24 mm,是喀斯特次生林的 187.89%。不同喀斯特森林类型的最大持水量集中在土壤层、乔木层和枯枝落叶层,喀斯特原生林的相应值为 96.11%、3.03%、0.81%,喀斯特次生林的相应值为 95.88%、2.51%、1.56%。

表 12 随降水流动的相关离子量在不同喀斯特森林类型内的分配
Table 12 Relative ion distribution transported by precipitation in experimental types of karst forests ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

		Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	NH_4^{+}	SO_4^{2-}	NO_3^{-}	Cl^{-}
No. 1	①	84.064	16.287	19.557	5.696	10.777	263.205	19.140	12.225
	②	168.525	32.395	37.442	2.759	19.814	539.025	24.594	11.050
	③	1.619	0.156	0.845	0.714	0.158	1.666	0.764	0.096
	④	11.320	3.283	0.856	0.876	0.010	26.229	0.662	0.535
No. 2	①	50.800	9.712	12.741	1.836	9.203	206.129	10.328	3.352
	②	94.162	20.911	34.576	1.623	9.058	335.028	11.622	4.579
	③	6.791	0.801	3.784	0.990	0.066	10.408	1.450	0.479
	④	3.312	0.789	0.886	0.182	0.386	8.368	0.214	0.310

No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1 ①:林隙降水携带离子量 Ion contents transported by precipitation in karst forest gap ②:林内降水携带离子量 Ion contents transported by precipitation in karst inner forest ③:地表径流携带离子量 Ion contents transported by soil surface runoff ④:90 cm 壤中流携带离子量 Ion contents transported by soil runoff in 90 cm

表 13 不同喀斯特森林类型最大持水量解析表
Table 13 Maximum water-retaining capacity in experimental types of karst forest ($\text{mm}, \text{mm} \cdot (3 \text{ cm})^{-1}$)

项目 Item	No. 1	No. 2
乔木层 Arboreous layer	21.96	8.82
灌木层 Arbuscular layer	0.29	0.19
草本层 Herbaceous layer	0.05	0.02
枯落物层 Litter layer	5.90	5.47
土壤层 A 层 A stratum	59.54 (6.62)	66.79 (5.14)
Soil layer B 层 B stratum	159.72 (7.26)	32.26 (3.23)
C 层 C stratum	477.86 (5.37)	238.18 (1.88)

No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1 括号值为加权值 The values in brackets are rational values

3.3.2 相关离子储量

植被层相关离子储量($N_p, \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$N_p = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (C_{kl} \times W_{kl}) \tag{5}$$

式中, C_{kl} 为某优势种(组)样株不同部位的相关离子含量(%); W_{kl} 为某优势种(组)样株不同部位的生物量($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$); K 为某林分乔木或灌木层的优势种(组)数; L 为优势种(组)样株的解析分量,如茎、枝、叶、根、皮等。草本或枯落物层的 K 和 L 值为 1。

土壤层相关离子量($N_{sj}, \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$):

$$N_{sj} = 10^{-3} \times (100 - M_j) \times V_j \times H_j \times C_j \tag{6}$$

式中, C_j 为土层离子含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); M_j 为土层石砾含量(%); V_j 为土层容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H_j 为土层厚度(cm)

土壤层相关离子量加权值($N_s, \text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (3 \text{ cm})^{-1}$):

$$N_s = \sum_{j=1}^J N_{sj} / H_j \tag{7}$$

式中, J 为土层数, H_j 为土层厚度(cm), N_{sj} 为土壤层相关离子量($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

喀斯特原生林植被层地上部分相关离子总量为 4.731 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 14),是喀斯特次生林的 224.43% ,相关离子量排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{N}^{3-} > \text{K}^{+} > \text{Mg}^{2+}$,总量排序为乔木层 > 枯落物层 > 灌木层 > 草本层。喀斯特原生林土壤层的相关离子量为 406.904 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是喀斯特次生林的 359.11% ;加权值为 9.059 $\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (3 \text{ cm})^{-1}$,是喀斯特次生林的 439.97%。

4 结论与建议

1) 黔中山地喀斯特森林内、外年降水量的变化趋势为:空地降水量 > 林隙降水量 > 林内降水量 > 灌草层降水量 > 地表和壤中流量 > 树干径流量 ;降

表 14 不同喀斯特森林类型相关离子量分布表
Table 14 Relative ions distribution in experimental types of karst forest ($\text{Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

项目 Item		No. 1				No. 2			
		N^{3-}	K^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	N^{3-}	K^{+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}
乔木层	Arboreous layer	0.793	0.571	2.197	0.559	0.304	0.217	0.834	0.211
灌木层	Arbuscular layer	0.024	0.003	0.058	0.003	0.016	0.002	0.039	0.002
草本层	Herbaceous layer	0.004	0.001	0.004	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001
枯落物层	Litter layer	0.228	0.073	0.178	0.034	0.212	0.068	0.166	0.031
土壤层 Soil layer	A 层 A stratum	2.910	5.831	1.524	8.783	2.352	4.392	0.225	1.236
	B 层 B stratum	1.993	26.010	3.559	44.006	0.987	3.620	0.223	1.670
	C 层 C stratum	5.991	112.072	10.790	183.435	7.482	67.911	1.658	21.553
加权值 Rational value		0.481	3.089	0.452	5.037	0.339	1.235	0.053	0.432

No. 1、No. 2 同表 1 See Table 1 土层中植物根系的相关离子量未计算 Relative ion contents of plant roots in soil are not counted

水量分配中 林地蒸发等量 > 灌草层降水截留总量 > 林冠层降水截留总量。土壤层最大持水量大于植被层。乔木层最大持水量 > 枯落物层 > 灌木层 > 草本层。喀斯特森林的调水能力包括最大持水潜力和截留量两方面。喀斯特原生林冠层最大持水量为年降水量的 2.10% ,灌草层相应值为 0.03% ,土壤层相应值为 66.80% ;喀斯特次生林的相应项为 0.85%、0.02% 和 32.31%。植被-土壤系统对降水量的分配中 ,降水总截留量和林地蒸发等量在喀斯特原生林的比例为 97.93%、在喀斯特次生林的比例为 97.89%。因此 ,喀斯特原生林的调水能力高于喀斯特次生林。

2) 随降水流动的 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^{+} 、 K^{+} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 Na^{+} 离子的月平均浓度在不同喀斯特森林类型的林隙、林内和树干径流中的年变化规律明显 ,夏季较低 ,冬季较高。 Na^{+} 的趋势性较弱 , NH_4^{+} 在林内和树干径流的趋势性较弱 , NO_3^{-} 在树干径流的趋势性较弱。固定样地集水区溪流水中相关离子浓度的变化趋势与林隙、林内和树干径流的不同。喀斯特原生林年随降水增加的相关离子量为 $430.951\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,经林冠层淋洗后的林内降水中相关离子量为 $835.604\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,增加了 1.94 倍 ,随地表径流和 90 cm 壤中流的输出量为 $49.789\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,随降水净增的相关离子量为 $381.162\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,喀斯特次生林的相应项为 304.101、511.559、1.68、39.216 和 $264.885\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,相关离子的输入-输出量较其它森林类型高。喀斯特原生林年随降水增加的相关离子量大于喀斯特次生林。

3) 喀斯特原生林植被层地上部分 N^{3-} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 总量为 $4.731\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$,是喀斯特次生林的 2.24 倍 ,变化趋势为乔木层 > 枯落物层 >

灌木层 > 草本层 ,离子量排序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{N}^{3-} > \text{K}^{+} > \text{Mg}^{2+}$ 。喀斯特原生林土壤层的相关离子量为 $406.904\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$,是喀斯特次生林的 3.59 倍 ,加权值为 $9.059\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot(3\text{ cm})^{-1}$,是喀斯特次生林的 4.40 倍。每年随降水输入喀斯特森林的相关离子量占植被-土壤系统中的总量较小 ,但有效性较高、流动性较大 ,对森林生长和林地养分循环有重要的生态学意义。

4) 与其它森林类型相比(刘世荣等 ,1996 ;余新晓等 ,2004) 黔中山地喀斯特森林水文学过程和养分动态有共性 ,也有特异性。云贵高原是我国地势走向的第二级台阶 ,南、北气流在此交汇 ,春、秋季停滞时间较长。黔中山地是一个破碎的高原面 ,海拔高度变幅不大 ,乌江及其支流密布其中 ,形成了若干峡谷、河谷和坝子 ,这无疑分解和重组了近地气流 ,干扰了森林与降水关系的规律性。有必要进一步量化地形和主要气象要素对喀斯特森林和降水关系的影响 ,补充森林类型以修正生境多样性导致的喀斯特森林水文规律性的变异 ,有必要进一步研究降水强度、降水量和持续时间对不同森林类型中坡度与土壤类型的地表径流和壤中流的影响。

参 考 文 献

Bonell M (1993) . Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forest. *Journal of Hydrology*, 150, 217 – 275 .

Dunkerley DL (2000) . Measuring interception loss and canopy storage in dry land vegetation: a brief review and evaluation of available research strategies. *Hydrological Processes*, 14, 669 – 678 .

Dunne T (1991) . Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, 27, 2271 – 2285 .

Feng ZW (冯宗炜) , Wang XK (王效科) , Wu G (吴刚) (1999) . *Biomass and Productivity of Forest Ecosystem in China* (中国森林生态系统的生物量和生产力) . Science Press, Beijing. (in Chinese)

- Gupta VK, Mesa OJ (1988). Runoff generation and hydrologic responses via channel network geomorphology: recent progress and open problems. *Journal of Hydrology*, 102, 3–28.
- Hargreaves GH, Samani ZA (1982). Estimation of potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 108, 223–230.
- Henderson GS, Harris CF, Todd DE (1977). Quality and chemistry of throughfall as influenced by forest type and season. *Journal of Ecology*, 65, 365–374.
- Henny AJ (1999). Waterflow and nitrate transport to a groundwater-fed stream in the Belgian-Dutch chalk region. *Hydrological Processes*, 13, 295–307.
- Jin XQ (金小麒) (2000). Eco-economic function of main forest stand types in Wujiang river watershed. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 14, 64–68. (in Chinese with English abstract)
- Kelliher FM (1989). Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands. *Oecologia*, 95, 153–163.
- Liu SR (刘世荣), Wen YG (温远光), Wang B (王兵), Zhou GY (周光益) (1996). *Ecophysiological Functions of Forest Ecosystems in China (中国森林生态系统水文生态功能规律)*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese with English abstract)
- Liu YL (刘映良) (2005). *A Study on the Vegetation Restoration of Degraded Ecosystem in Typical Karst Mountainous Area (喀斯特典型山地退化生态系统植被恢复研究)*. PhD dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing. (in Chinese with English abstract)
- Lu RK (鲁如坤) (2000). *Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry (土壤农业化学分析方法)*. Chinese Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese)
- Mei ZM (梅再美), Xiong KN (熊康宁) (2003). A study on the dynamic characteristics of soil erosion and eco-benefit evaluation in karst region—a case study on Qingzhen demonstrating site of returning farmland to wood (grass), Guizhou. *Carsologica Sinica (中国岩溶)*, 22, 136–143. (in Chinese with English abstract)
- Neary AJ, Gizyn WI (1994). Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopy in south-central Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 24, 1089–1100.
- Oyarzún C, Godoy R, Sepúlveda A (1998). Water and nutrient fluxes in a cool temperate rainforest at the Cordillera de la Costa in Southern Chile. *Hydrological Processes*, 12, 1067–1077.
- Parker GG (1983). Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, 13, 58–135.
- Peter DL (1995). Runoff production in a forested, shallow soil, Canadian shield basin. *Water Resources Research*, 31, 1291–1304.
- Putuhen WM, Cordery I (1996). Estimation of interception capacity of the forest floor. *Journal of Hydrology*, 180, 283–299.
- Ran DC (冉顶丞), He SY (何师意), Cao JH (曹建华), Xiong ZB (熊志斌), Chen HM (陈会明) (2003). A study on hydrological benefit of karst forest in Maolan. In: Zhu SQ (朱守谦) ed. *Ecological Research on Karst Forest (喀斯特森林生态研究) (III)*. Guizhou Science and Technology Press, Guiyang, 135–140. (in Chinese)
- Schaap MG, Bouten W (1997). Forest floor evaporation in a dense Douglas fir stand. *Journal of Hydrology*, 193, 97–113.
- Stednick JD (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176, 79–95.
- State Forestry Administration of China (国家林业局) (1999). *Forest Soil Analysis Methods—Forestry Professional Standards of China, LY/T 1210–1275 (中华人民共和国林业行业标准——森林土壤分析方法)*. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese)
- State Weather Administration of China (中央气象局) (1979). *Meteorological Observation at Ground Standards (地面气象观测规范)*. China Meteorological Press, Beijing. (in Chinese)
- Thornthwaite CW (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55–94.
- Viville D (1993). Interception on a mountainous declining spruce stands in the Strengbach catchment (Voges, France). *Journal of Hydrology*, 144, 892–898.
- Wei QF (韦启番) (1996). Erosion characteristics and prevention of karst area in the southern of China. *Research of Soil and Water Conservation (水土保持研究)*, 3(4), 72–76. (in Chinese with English abstract)
- Yu LF (喻理飞), Zhu SQ (朱守谦), Ye JZ (叶镜中), Wei LM (魏鲁明), Chen ZR (陈正仁) (2002). Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 38(1), 1–7. (in Chinese with English abstract)
- Yu XX (余新晓), Zhang ZQ (张志强), Chen LH (陈丽华), Xie BY (谢宝元), Wang LX (王礼先) (2004). *Forest Ecological Hydrology (森林生态水文)*. China Forestry Publishing House, Beijing. (in Chinese)
- Zhu SQ (朱守谦) (1997). *Ecological Research on Karst Forest (喀斯特森林生态研究) (II)*. Guizhou Science and Technology Press, Guiyang. (in Chinese)
- Zhou ZX (周政贤) (1987). *Scientific Survey of the Maolan Karst Forest (茂兰喀斯特森林科学考察集)*. Guizhou People's Publishing House, Guiyang. (in Chinese)