

贵州省喀斯特地区原始林水化学特征

卢晓强^{1,3}, 丁访军², 方升佐^{1,*}, 户田浩人³, 生原喜久雄³, 魏鲁明⁴

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550005;

3. 东京农工大学, 东京 183-8509; 4. 茂兰国家自然保护区管理局, 荔波 558400)

摘要:降水是森林生态系统的一个主要的养分输入源, 观测并分析降水化学对于准确地估算森林生态系统养分循环的养分元素浓度与量显得极为重要。对贵州省茂兰国家自然保护区原始林森林群落 2007 年 9 月—2008 年 8 月的降水进行定位观测与分析。结果表明:(1) 在林外雨、林内雨、树干流和溪流水中,除了 Na^+ 之外, pH 值与大部分的养分元素的浓度表现出明显的季节变化,冬季与早春浓度较高,夏季浓度较低。这与各季节的降雨量不同而导致浓度稀释或者浓缩有关。(2) 大气降雨通过林冠的过程中,养分元素的浓度出现了较大的变化,林内雨与树干流中的浓度基本高于大气降雨;养分元素变化中,浓度差异较大的元素是 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} , K^+ 在林内雨和树干流的浓度分别是大气降雨的 14 倍和 21 倍; Mg^{2+} 浓度分别为大气降雨的 12 倍和 9 倍; Ca^{2+} 浓度分别为大气降雨的 4 倍和 3 倍,这与大气降雨通过林冠,与树体的养分交换以及树体养分的解脱有关。(3) 通过林内雨,树干流输入样地较多的养分元素是 K^+ 和 Ca^{2+} , 分别是 $35.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $31.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 通过溪流水输出的元素中,较多的是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 分别是 $-547.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-144.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 其次是 SO_4^{2-} , 而 $\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量不足阳离子总量的 1%, $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ 总量不足阴离子总量的 1%。这可能与母岩风化是碳酸岩类岩石风化有关。(4) 年养分的垂直移动量特征显示,土壤 0cm 到土壤 5cm 的养分元素量变化较明显,无机态 N 量的变化可能跟微生物的氮固定、无机化或者植被的吸收有关。(5) 研究地的年养分元素量收支分别为 N $2.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; K $25.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; Ca $-547.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; Mg $-144.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; Na $-4.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; Cl $2.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $\text{SO}_4^{2-} - \text{S} = 5.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在年养分的输入与输出中,无机态 N 跟 K^+ 显示正收支, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为负收支,而 Na^+ 、 Cl^- 相对较稳定。

关键词:喀斯特地区;原始林;养分元素;大气降雨

Characteristics of nutrient elements with water transport in the primary forest in a Karst area of Guizhou Province

LU Xiaoqiang^{1,3}, DING Fangjun², FANG Shengzuo^{1,*}, Toda Hiroto³, Haibara Kikuo³, WEI Luming⁴

1 Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 Guizhou Academy of Forestry Sciences, Guiyang 550005, China

3 Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo 183-8509, Japan

4 Management Bureau of Maolan National Nature Reserve, Libo 558400, China

Abstract: Because of precipitation serves as one of major approaches of nutrient input into the forest ecosystem, the accurate measurement of its volume and ion concentration is of prime importance in an evaluation of nutrient biogeochemical cycle. Therefore, the chemistry of precipitation within a year was monitored and analyzed in a primary forest in the Maolan Natural Reserve, a Karst region in Libo, Guizhou Province. The movement patterns of nutrient elements through hydrological processes could be understood by monitoring chemistry data of water. The investigation period was from September, 2007 to August, 2008. The results showed: (1) The pH and most concentrations of most nutrient elements in precipitation, throughfall, stemfall and streamflow varied seasonally except for Na^+ , with maxima in winter or early spring and minima in summer. This may be resulted from the concentration dilutions or inspissations due to the varieties of water discharge. (2)

基金项目:国家林业局公益项目(200704005/wb03);国家林业局重点项目(2008-17)

收稿日期:2009-09-18; 修订日期:2010-02-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangsz@njfu.com.cn

The nutrient elements in throughfall and stemflow were significantly higher than those in the precipitation when rainfall passed canopy. The concentrations of K^+ , Mg^{2+} , and Ca^{2+} were altered more than the other nutrient elements. The concentration of K^+ in throughfall and stemflow was 14 times and 21 times higher than those in precipitation, respectively. The concentration of Mg^{2+} in throughfall and stemflow was 12 times and 9 times higher than those in precipitation, respectively. The concentration of Ca^{2+} in throughfall and stemflow was 4 times and 3 times higher than those in precipitation, respectively. This probably resulted from the exchange of cations and the canopy leaching. (3) Through throughflow and stemflow, the most nutrient elements which was input the sites were K^+ and Ca^{2+} i. e. 35.8 and 31.5 kg $hm^{-2} a^{-1}$, respectively. The most nutrient elements output through streamflow were Ca^{2+} and Mg^{2+} , i. e. 579.5 and 152.9 kg $hm^{-2} a^{-1}$, respectively, $SO_4^{2-}-S$ coming next, $Na^+ + K^+ + NH_4^+-N$ accounts for less than 1% of the total cations, and $Cl^- + NO_3^- -N$ accounts for less than 1% of the total anions. These general features indicated that the chemical composition of water was largely controlled by carbonate weathering. (4) The characteristics of annual vertical movements of elements indicated the concentrations of nutrient elements in soil water were varied from 0cm to 5cm. The concentration levels of NH_4^+-N and $NO_3^- -N$ in the soil water suggested that the transformation might be caused by microbes through nitrogen fixation, nitrification and uptake by vegetation. (5) The nutrient budget (e. g. throughfall + stemflow – streamflow) within one year in the forest was 2.9 for N, 25.2 for K, -547.4 for Ca, -144.5 for Mg, -4.0 for Na, 2.5 for Cl, -5.9 kg $hm^{-2} a^{-1}$ for $SO_4^{2-}-S$, respectively. Our results showed that annual inputs exceeded outputs for dissolved inorganic N and K^+ , The watershed had net losses of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and was close to steady state for Na^+ and Cl^- in the forest.

Key Words: karst region; primary forestry; nutrient elements; precipitation

世界碳酸盐类岩石地区约占全球陆地面积的 12%^[1],其中,包括地下母岩是碳酸盐类岩石的中国的碳酸盐类岩石地区面积约 334.3 万 km^2 。露出地面的称为喀斯特的地区约 137 万 km^2 ,占我国国土面积的 14%^[2]。中国西南部的贵州省,喀斯特地区占全省面积的 73%。作为母岩的碳酸盐类岩石,易风化且成土速度缓慢,在该地区形成一个特有的脆弱生态环境。随着人口的不断增加,耕地的大规模开垦,燃料的过度采伐,致使森林大量减少,地表土大量流失,岩石大面积的裸露,形成石漠化^[3]。

近年,随着石漠化面积的不断扩大,干旱、洪水等自然灾害的发生也更频繁,特别是 1998 年发生的长江大洪水,其中长江上游地区大面积的森林砍伐,坡地开垦,使该地区森林涵水能力降低,水土流失加剧,是导致此次灾害的一个重要原因。控制水土流失,改善当地生态环境,减少下游泥沙淤积,是减少这类自然灾害发生的一个有效途径。为此“退耕还林”以及“天然林保护工程”开始全面实施,如何能更有效地更迅速地改善当地的生态环境,大量学者对此进行了研究。目前,研究主要集中在岩溶生态系统,植被群落演变,立地质量变化,土壤微生物以及植被恢复技术等方面^[4-7]。对喀斯特森林生态系统的水文特征也进行了一定的探讨^[8-10],但对有关水化学即伴随着降水的养分循环的研究还是一片空白。为了评价喀斯特石漠化地区的植被和生态公益机能的恢复程度,喀斯特地区森林的水化学即伴随降水的养分循环的定量化研究显得尤为重要。本文通过对喀斯特地区原始林森林降水的养分元素的输入与输出进行了研究,可以为当前喀斯特退化地区植被恢复提供重要的参考价值。

1 调查地与调查方法

1.1 调查地概况

试验地位于贵州省南部,是黔、桂交界的荔波县内的茂兰国家自然保护区(25°09'—25°20'N, 107°52'—108°05'E),面积约为 221 km^2 ,森林覆盖率达 87.3%,年平均气温 15.3℃,年降水量 1752mm,年相对湿度 83%,属典型的亚热带温湿气候。区内为典型的喀斯特峰丛地貌,海拔最高 1078.6m,最低 430m,平均约 800m。该区是当今世界上保存较为完好的喀斯特森林生态系统,也是喀斯特地区原生性森林分布面积最大的地区^[8]。2007 年 6—9 月在上、中、下坡各设置 4 个样地,对土壤及植被进行了调查,从土壤的调查结果来

看,土壤以黑色石灰土为主,土层浅薄且土体不连续,土壤pH值7.5—8.0。地面碳酸盐类岩石大面积裸露,裸露率高达80%;从植被调查结果来看,胸径大于等于5cm的立木的平均胸径11.5cm,平均树高9m,郁闭度100%。主要树种有圆果化香(*Platycarya longipes*)、云贵鹅耳栎(*Carpinus pubescens*)、朴树(*Celtis tetrandra*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)等落叶树种及青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、樟叶槭(*Acer cinnamomifolium*)、腺叶山矾(*Symplocos adenopus*)等常绿树种,构成了常绿落叶阔叶混交林,其中常绿树种约占60%。

1.2 调查方法

2007年9月—2008年8月在已调查的12个样地里选择一个较有代表性的样地,在林地的边缘空旷地离地1m,设置一个林外雨收集器。根据树冠分布特征,选择具有代表性的4个点设置漏斗型林内雨收集器,漏斗下方放置容量20L塑料容器收集林内降水。按林分的径阶分布特征,选取平均胸径11—12cm左右,且树型具有代表性的4株植株作为标准木收集树干流。在每株树干基部50—130cm处,将硬度适中直径3cm聚乙烯塑料管螺旋状缠绕树干四周,并用3mm厚度塑料皮粘在聚乙烯塑料管上,形成一个导流槽,并将其导入下部的20L塑料容器。在小流域的出口处收集溪流水水样。半月收集1次水样,共收集24次,收集时使用量筒进行水量的测量并记录。后用100mL塑料瓶取样,将收集的水样带回实验室进行分析。

土壤水移动的养分量,采用离子交换性树脂圆筒(以下简称树脂圆筒)进行调查。水分从地表进入土壤的渗透过程中,通过树脂圆筒时可溶性无机离子被离子交换性树脂吸收,抽出吸附的无机离子即为一定放置时间内无机离子的通过量。以此计算一定时间内通过水的移动,进入土壤的各养分量。因调查地的土层浅薄且土体不连续,分别在土壤0、5cm两层各放置15个直径6cm,高3cm的盛有30g离子交换性树脂的树脂圆筒。放置一年后回收,样品带回实验室分析。以此测定一年中伴随着水的移动而进入土壤的养分量。

1.3 分析方法

水样分析方法 pH测定采用电极法(型号:HM-60S),测定后将剩余水样利用5B滤纸过滤后,进行以下各项目分析: Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 采用原子吸收光谱法(型号:ASC-6000型)测定, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 采用离子色层分离法(型号:HIC-6A型)测定。

土壤水 具体的交换树脂的抽出方法及再生方法参考Haibara^[11]。抽出液的测定,阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 采用原子吸收光谱法(型号:170-10型)测定, NH_4^+ 以及阴离子 NO_3^- 采用紫外可视分光法(型号:870-UV型)测定。

2 结果与分析

2.1 pH与各养分元素浓度的动态变化

林外雨、林内雨、树干流和溪流水中的pH和各养分元素浓度的动态变化见图1,从pH的变化来看,2007年10月—2008年3月降雨量较少,pH变化较大,2007年6月—9月降雨量较大,pH变化趋势较稳定,这跟降水多,溶存物质稀释,总离子浓度降低有关。从阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 以及阴离子 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等浓度的月变化来看,第一,跟降水量的大小有关。2007年10月份—2008年3月即秋冬季,各水量的养分元素浓度较大,变幅也较大,这一时期降雨量相对较少,对养分元素具有一定的浓缩效应。2008年4月份—2008年9月份即春夏季,养分元素浓度降低,变幅趋于平稳,与该时期的降雨量增多有一定的关系,降雨量增大,对浓度具有一定的稀释作用,导致林内雨,树干流,溪流水的浓度降低^[12];第二,有的学者认为,不同季节的养分浓度与树木的生长活动有关。在冬季树木进入生长停滞期各养分元素易溶脱^[12],这跟本次研究中冬季浓度较大相符合。而在春季,树木在这一时期开始复苏,展叶,幼芽生长,吸收大量的养分,对溶脱具有一定的阻碍作用^[12];第三,这也可能跟当地不同季节存在不同季风有关,养分主要是大气中的粉尘与气体等通过干性沉降以及伴随降水的湿性沉降进入生态系,不同的季风对周围不同方向的城市工业等排放的废气或者汽车排放的尾气的输送都有不同的影响,这一点有必要结合更详细的气象材料进行进一步的研究。从各离子浓度比较来看, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 的含量最高,跟本调查地立地母岩——碳酸盐类岩石的存在有关。 Na^+ 与 Cl^- 的浓度较低,跟两离子起源有关,一般认为这两种离子的来自于大海。而作为内陆省份的贵州省相对浓度较小。

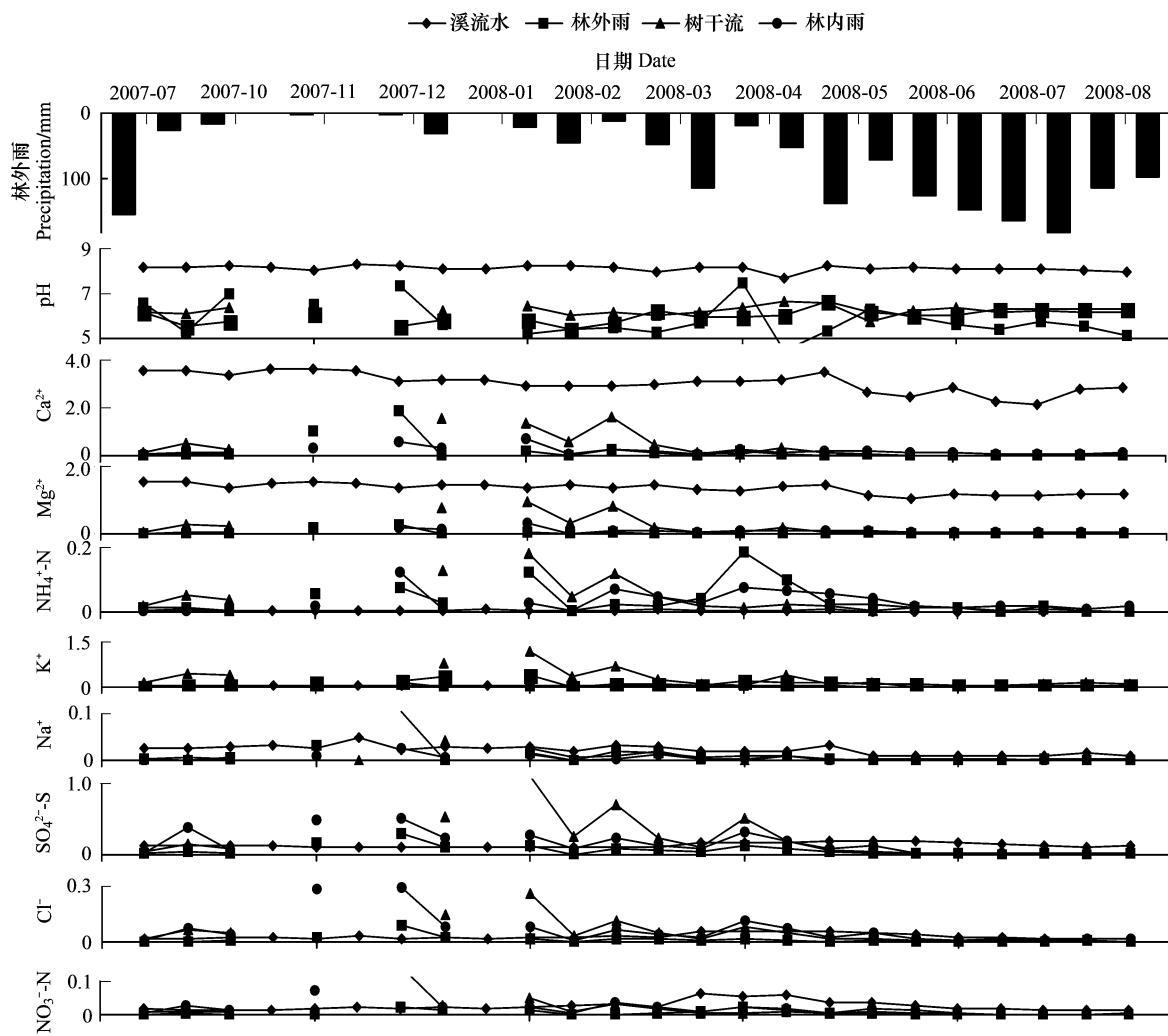
图1 pH与各离子的动态变化/(mmol·L⁻¹)

Fig. 1 Seasonable variations of pH and dissolved element concentrations in precipitation, throughfall, stemflow and streamflow

2.2 pH值与养分的浓度

降水过程中有关的pH与各离子加权平均浓度见上表1,林内雨pH值6.17与林外雨pH值5.69相比有所上升。降雨通过树冠后,伴随着H⁺离子的消费,主要考虑干性沉降物的消耗(例如CaCO₃等),以及树体表面,细胞的交换基吸附的阳离子交换的影响,特别是认为其中K⁺的浓度在林内雨中浓度增加了14倍,与H⁺的减少有密切的关系^[13]。Shibata等人^[14]通过pH4.0的人工雨的散布实验结果显示,落叶层通透水的pH值

表1 林外雨、林内雨、树干流和溪流水中pH与各养分元素的加权平均浓度

Table 1 pH and Volume-weighted Mean concentration of nutrients in precipitation, throughfall, stemflow and streamflow/(mmol·L⁻¹)

| 项目 Item | pH | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | NH ₄ ⁺ -N | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ -N | SO ₄ ²⁻ -S |
|-------------------|------|------------------|------------------|----------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 林外雨 Precipitation | 5.69 | 0.03 | 0.0043 | 0.005 | 0.003 | 0.021 | 0.005 | 0.003 | 0.03 |
| 林内雨 Throughfall | 6.17 | 0.12 | 0.0532 | 0.072 | 0.003 | 0.024 | 0.026 | 0.009 | 0.07 |
| 树干流 Stemflow | 6.24 | 0.08 | 0.0366 | 0.107 | 0.002 | 0.013 | 0.015 | 0.004 | 0.05 |
| 溪流水 Streamflow | 8.09 | 3.00 | 1.3053 | 0.033 | 0.022 | 0.005 | 0.028 | 0.025 | 0.13 |

达到5.0以上。树干流的pH值6.24,与林外雨相比也上升。溪流水pH值8.09,与林内雨相比较,有较大幅度地增加,林内雨通过土壤,大量的阳离子交换,主要是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度大幅度的上升有直接关系。

从林外雨到林内雨的过程中,除了 Na^+ 、 NH_4^+ 的浓度基本没变之外,在林内雨中各养分元素浓度都有不同程度地增加,特别是 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 分别增加了13倍、11倍和4倍。与周梅等人^[15]对兴安落叶松原始林区降水化学输入的特征(K 、 Ca 、 Na 、 Mg)进行了研究结果相比较,林外雨中的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 浓度较一致,但从降雨通过树冠后林内雨的含量却出现较大的变化,除了 K^+ 跟 Na^+ 浓度变化趋势表现相一致外, Mg^{2+} 的浓度基本没变, Ca^{2+} 表现出相反的浓度降低。这跟本调查地特殊的立地环境——母岩是碳酸盐类岩石有关。本调查中,林内雨与林外雨的比例(以下简称T)呈现, K^+ 、 Mg^{2+} (12.4—14.4)> Cl^- 、 Ca^{2+} (4.0—5.2)> NO_3^- 、 SO_4^{2-} (2.3—3.0)> NH_4^+ 、 Na^+ (1—1.1)的顺序。Parker^[16]对过去大量的调查结果总结得出,T值大致为: K^+ (11.2)> Mg^{2+} , Cl^- 、 Ca^{2+} (2.8—3.1)> Na^+ , SO_4^{2-} (2.3—2.4)> NH_4^+ , NO_3^- (1.5—1.9),与本研究的结果比较相似。说明降雨通过树冠后,溶存阳离子增加, H^+ 浓度降低^[17]。从表中可以看出,降雨通过林冠形成林内雨使其养分含量发生了较大的变化,主要考虑到降水在林冠中溶脱和洗脱作用。除 Na^+ 、 NH_4^+ 以外,其他离子都表现出显著的增加, Na^+ 浓度主要考虑作为内陆省份的贵州省,总体浓度较低。 NH_4^+ 离子通过树冠时,一方面由于洗脱表现出浓度上升,另一方面,由于氧化反应转换成 NO_3^- ,导致浓度的降低^[18]。树冠经过降雨的淋溶,溶脱出大量的养分,其中 K^+ 被认为是最易溶脱的养分元素。树冠的溶脱和吸收量与干性沉降区分相对比较困难。很多文献结果显示, K^+ 在林外雨的浓度不一定最高,但却表现出最容易溶脱,且增加幅度最大的,许多学者认为, K^+ 比 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相比,移动性更高,更易溶脱^[13]。Nakamori等人^[18]通过溶脱速度的实验,进一步证实 K^+ 的溶脱速度和溶脱量最大,其次是 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 。特别是从养分元素浓度的比例来看,本研究中 Ca^{2+} 含量最高,这可能跟喀斯特地区森林中树冠吸附的 Ca^{2+} 量较大有关。

树干流中的养分元素浓度除了 K^+ 的浓度明显高于林内雨浓度外,其他养分元素都出现不同程度的降低,这跟有些研究者对树干流高于林内雨研究的结果不太一致^[19-20],这可能由于喀斯特地区植株的树皮较其他地区光滑,在树干的停留时间短,不利用养分的洗脱与溶脱,并且跟树干流量小的原因有关。可以说,树干流中的养分浓度增加还是降低,不同的森林类型,不同的立地会表现出不同的结果。

溪流水中离子浓度的大小顺序为: Ca^{2+} > Mg^{2+} > SO_4^{2-} > Cl^- > K^+ > NO_3^- > Na^+ > NH_4^+ ,而刘方等人^[10]在喀斯特石漠化退化地区研究的结果表现出, SO_4^{2-} 的浓度最大,其他离子的顺序基本没变。这跟研究地原始林分有关,说明良好植被对 SO_4^{2-} 具有一定的净化作用有关。溪流水中的养分元素浓度与林内雨中的相比, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 大量增加, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 小幅度的增加,而 K^+ 、 NH_4^+ ,表现出降低的趋势,但是 Cl^- 浓度基本没变。

2.3 养分量的垂直变化

部分养分元素的垂直移动量见图2,林外雨,林内雨,树干流和溪流水的养分量是由各水样浓度与水量的乘积合计所求。土壤水0cm土壤水5cm的元素通过量采用一年放置的离子交换树脂所吸附的养分元素量所求。降水通过 A_0 层进入土壤,在土壤中渗透,最后形成溪流水,这一过程中,各养分元素量发生了很大的变化,原因主要是,降水通过 A_0 层,各养分元素量都大量的增加,从土壤水0cm到土壤水5cm最后到溪流水,不同的养分元素表现出不同的变化特征,考虑到降水通过土壤层时,树木根的吸收与土壤粒子离子的交换以及微生物的作用等而使养分元素量发生变化。

从图2可以看出 K^+ 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的浓度降低,一般认为:一方面,通过树木根系的吸收再次被吸收;另一方面,可能跟土壤中的氨态氧化菌的氧化作用、亚硝化菌的硝化作用有关,以及微生物脱氮作用有关^[21],从而导致浓度的降低,并且这个过程中也伴随着 H^+ 的放出,可以说 H^+ 的降低还是减少作用共存,所以实际上,通过 A_0 层之前的降水跟溪流水中的 H^+ 离子的变化量,应该比土壤的吸收量更少,从这里可以看出,当前研究地土壤具有较强的酸中和能力(土壤较浅薄,需要进行更深层次的实验)。从 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的变化趋势来看,林内雨通过 A_0 层, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的大量附加,在土壤的渗透中,量不断地增加,土壤中的交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 较

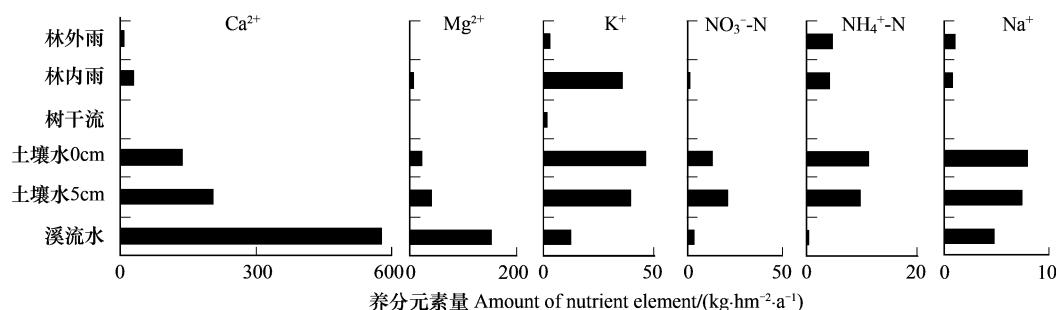


图2 年间养分的垂直移动量

Fig.2 The characteristics of annual vertical movements of elements

多,大量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子从土壤中释放到土壤水中。另一个方面间接说明, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 阳离子的大量增加,使林内雨到溪流水的过程中pH逐渐上升,即在通过土壤层时, H^+ 离子被土壤中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 等离子大量进行了交换。从 K^+ 的浓度变化来看,林内雨通过Ao层, K^+ 的量大量增加,但通过土壤渗透时量逐渐减少,主要是经过土壤层时,喀斯特地区由于土壤浅薄,土壤表层布满大量的根系,随即通过植被的根系的所吸收。

2.4 养分的收支

2007年9月—2008年8月,通过每个月2次水样的浓度与水量的乘积,计算出每公顷年间林外雨、林内雨、树干流、溪流水的养分元素量以及养分收支见表2,一般的,林外雨以及树干流的养分元素量增加的原因,主要是树体表面付着的灰尘粒子的洗脱,以及树体的溶脱有关,从灰尘粒子的洗脱的养分元素量,作为整个生态系统的养分元素输入量,而把树体的溶脱养分元素量作为林分内部的养分还元量。从本调查的结果来看,无机态N($\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}$)、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 $\text{SO}_4^{2-} \text{-S}$ 在林外雨的养分元素量,分别为5.5、3.0、9.4、0.9、1.1、2.6、7.2kg/ hm^2 。在林内雨+树干流的养分元素量分别为6、37.5、32.2、8.4、0.8、12.2、14.3kg/ hm^2 。Haibara等人^[22]在东京农工大学的实习林的研究结果指出,K、Mg、Cl、Ca林内雨+树干流的养分元素量约为林外雨养分元素量的2倍,推定且由于灰尘粒子的洗脱而使林内雨树干流的K的增加量一般9—15kg/ hm^2 。本研究中从增加的比例来看,其中K、Mg、Cl、Ca分别增加到12、9、5、3倍左右。可以看出K的增加由于溶脱的影响较大,而Mg、Ca树体表面付着的灰尘粒子的洗脱影响较大。对于干性沉降以及湿性沉降的养分元素增加量的比例如何,有必要进一步的探讨。本研究中,两者没有区分。溶脱量作为外部的输入量,采用林内雨+树干流-溪流水的养分元素量进行计算养分元素量的收支,结果显示:无机态N($\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N}$)、 K^+ 以及 Cl^- 表现出正收支,其他养分元素表现出负收支,说明当前的喀斯特原始林对N具有一定的净化作用。对于 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 两个养分元素大量流失,多数的研究学者指出, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 负的收支较多^[22]这跟母岩的风化导致的大量溶出有关。

表2 流域的养分收支

Table 2 Nutrient budget for the experimental watershed/(kg·hm⁻²·a⁻¹)

| 项目 Item | $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ | $\text{NO}_3^- \text{-N}$ | K^+ | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^+ | Cl^- | $\text{SO}_4^{2-} \text{-S}$ |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|---------------|------------------------------|
| 林外雨 Precipitation | 4.8 | 0.7 | 3.0 | 9.4 | 0.9 | 1.1 | 2.6 | 7.2 |
| 林内雨 Throughfall | 4.3 | 1.5 | 35.8 | 31.5 | 8.2 | 0.8 | 12.0 | 14.0 |
| 树干流 Stemflow | 0.1 | 0.0 | 1.6 | 0.6 | 0.2 | 0.0 | 0.2 | 0.3 |
| 溪流水 Streamflow | 0.6 | 3.4 | 12.3 | 579.5 | 152.9 | 4.8 | 9.7 | 20.2 |
| 养分收支 Nutrient budget | 3.8 | -1.9 | 25.2 | -547.4 | -144.5 | -4.0 | 2.5 | -5.9 |

3 结论与讨论

从养分元素的计算来考虑,年间的养分元素的输入与输出跟年降雨量以及降雨分配特征有密切的关

系,2007年9月—2008年8月本研究地总降雨量为1621mm。以往的报告指出这个地区的年平均降雨量为约1321mm^[5,23],本次研究测定的降雨量较往年多,所以1a的数据难以确切的反映当地的实际降雨量以及降雨分配情况,需进行2a乃至多年的连续观测。其中林内雨量、树干流量及树冠截留量,分别占78%,3%,19%,与朱守谦等人^[8]在该地区的测定结果(79.5%,7.5%,13%)相比,有较大的差异。不少研究者指出林内雨,树干流等受降雨特性如降雨强度、持续时间、方向、角度、雨滴大小等影响^[24-25],且具有较强的空间异质性^[26],所以为了更准确的反映当地的水化学特征,需要解决林内穿透雨空间分布不均的状况,今后增加受雨器的面积或者增加测定的重复数,以减少因林内穿透雨的空间异质性带来的误差。

本研究中的养分元素流出量,通过溪流水量的年间流失总量与全年养分元素加权平均浓度的乘积所得,由于喀斯特特殊的立地特征及试验条件的限制,没能对研究地溪流水量进行实际测量。基于水文学方法的思想,溪流水量通过总降雨量-蒸发散量计算,其中蒸发散量采用Thornthwaite的经验公式进行计算^[27]。所以相对来说结果与实际有所差异,且对于森林蒸发散来说,目前还缺少一种比较可靠的观测技术手段,各种常用估计蒸发散的方法存在不同程度的问题,构成研究森林流域水量中的难点。目前来说主要有五种方法,水文学方法、微气象法、生理学方法、SPAC模拟方法、遥感估计方法^[27]。对于喀斯特这种特殊的立地类型,如何能更准确的反映实际的溪流水量,更加准确的对有关的观测或分析方法有待进一步探讨。

本文中对于整个流域的养分元素量的收支计算,采用了林内雨+树干流-溪流水中沉降量的方法,溶脱量作为外部的养分元素输入量,没有对干性沉降与湿性沉降进行区分。Muramoto^[12]在日本信州大学山岳科综合研究所所属林地,对于不同的树种,不同的植被覆盖下的样地进行实验,通过利用Kobayashi公式^[28],分析并探讨了对于各种条件下林内降雨中干性沉降与湿性沉降的比例与差异,以及各林分中干性沉降的特点。Wu等人^[29]利用变数增加法,分析了日本扁柏与日本柳杉两个不同林分中,干性沉降与溶脱的比例的差异与原因。为了能更加准确的分析喀斯特地区原始林的养分循环特征,作者认为,对适合喀斯特地区的干性沉降与湿性沉降的计算方法,有必要进行进一步探讨。

References:

- [1] Ford D C, P W Williams. Karst Geomorphology and Hydrology. London: UnwinHyman, 1989: 1-20.
- [2] Chen Y T, Yu J Z. Karst in China. Beijing: Science Press, 1985: 55-60.
- [3] Wang S J. Concept deduction its connotation of Karst rocky desertification. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 101-105.
- [4] Zhou Y C, Pan G X. Adaptation and adjustment of Maolan forest ecosystem to Karst environment. Carsologica Sinica, 2001, 20(1): 47-52.
- [5] Long C L, Yu S X, Wei L M, Xiong Z B. Disturbance regimes and the characteristics of gaps in Maolan Karst forest, Guizhou Province. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 13-19.
- [6] Lu X Q, Fang S Z. Studies on the early growth and dynamics of leaf nutrient of eight tree species in the Karst mountain areas of Guizhou province. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2008, 1: 42-46.
- [7] Tian Y, Haibara K, Toda H, Ding F J, Liu Y H, Choi D S. Microbial biomass and activity along a natural pH gradient in forest soils in a Karst region of the upper Yangtze River. China. Journal of the Japanese Forest Society, 2008, 13: 205-214.
- [8] Zhu S Q. Ecological Research on Karst Forest (II). Guiyang: Guizhou Scinence&Technology Press, 2003: 136-140.
- [9] Su W C. Groundwater resource and their ways of development in Guizhou Karst region. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 92-95.
- [10] Liu F, Wang S J, Luo H B, Liu Y H, He T B, Long J. Vegetation succession with Karst rocky desertification and its impact on water chemistry of runoff. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 26-32.
- [11] Haibara K, Aiba Y, Kawashima Y. Use of exchange resin(IER) to study the movement of elements in forest soil. Japanese Journal of Ecology, 1990, 40: 19-25.
- [12] Muramoto M, Nara M, Asari T, Suzuki K. Hydro-chemical cycle of forest ecosystem in the Norikura Highlands 1. Chemical characteristic and seasonal change of throughfall in forest ecosystem. Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences, 2007, 37(3): 73-83.
- [13] Naemura A, Yoshikawa T, Satoh K, Dokiya Y. Measurement of throughfall and stemflow of Cryptomeria Japonica in Oku-chichifu and Tama Tills. Japanese Journal of Biometeorology, 2003, 39(4): 121-125.
- [14] Shibata H, Sakuma T. Canopy modification of precipitation chemistry in deciduous and coniferous forests affected by acidic deposition. Soil Science

- Plant Nutrition, 1996, 42:1-10.
- [15] Zhou M, Yu X X. Study of rainfall hydrochemical import characteristics in larix gmelini virgin foest. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(2):119-121.
- [16] Parker G G. Evaluation of dry deposition, pollutant damage, and forest health with throughfall studies // Lucier A. A, Haines, S. G. eds. Mechanism of Forest Response to Acidic Deposition. New York: Springer-Verlag, 1990: 10-61.
- [17] Arthur M A, Fahey T J. Throughfall chemistry in an Engelmann spruce-subalpine fir forests in north central Colorado. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23:738-742.
- [18] Nakamori Y, Iwamoto N, Naito M. Analysis of subjunctive Urban Environmental evaluation structure by the Choquet integral model. Environmental Sciences, 1995, 8(1):25-34.
- [19] Gong H D, Wang K Y, Yang W Q. Nutrient characteristics of throughfall and stemflow in three forests at the Subalpine of Western Sichuan. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(5):14-20.
- [20] Fan H B, Wei H. Estimation of dry deposition and canopy exchange in Chinese fir plantations. Forest Ecology and Management, 2001, 147: 99-107.
- [21] Zeng G M, Zhang G, Huang G H, Jiang Y M, Liu H L. Exchange of Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ and uptake of H^+ , NH_4^+ for the subtropical forest canopies influenced by acid rain in Shaoshan forest located in Central south China. Plant Science, 2005, 168:259-266.
- [22] Haibara K, Aiba Y. The nutrient circulation and budget for a small catchment basin of an established Sugi and Hinoki stand. Journal of the Japanese Forest Society, 1982, 64:8-14.
- [23] Liu J M. The reproductive and regenerative countermeasures of the main woody species in Maolan Karst forest. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(5):114-118.
- [24] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of type, ground cover and climate. Hydrological Processes, 2000, 14:2903-2920.
- [25] Schellekens J, Scatena F N, Bruijnzeel L A, Wickel A J. Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico. Journal of Hydrology, 1999, 225:168-184.
- [26] He C Q, Xue J H, Wu Y B, Zhang L Y, Liu C, Liu X L. Rainfall redistribution in subalpine Quercus aquifoloides forest in upper reaches of Minjing River. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9):1871-1876.
- [27] Cheng G W, Yu X X, Zhao Y T. The hydrological cycle and its mathematical models of forest ecosystem in mountains. Beijing: Science Press, 2004, 143-165.
- [28] Kobayashi T, Nakagawa Y, Tamaki M, Hira K, Shoga M. Evaluation of acidic deposition onto the forest canopies-study on the method of estimating dry deposition and leaching rate dividedly-. Environmental Sciences, 1995, 8(1):25-34.
- [29] Wu G, Haibara K, Aiba Y, Toda H. Separations of dry deposition and canopy leaching of dissolved elements in throughfalls of Japanese cedar and cypress stands. Journal of the Japanese Forest Society, 1996, 78(4):461-466.

参考文献:

- [3] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2):101-105.
- [4] 周运超, 潘根兴. 茂兰森林生态系统对岩溶的适应与调节. 中国岩溶, 2001, 20(1):47-52.
- [5] 龙翠玲, 余世孝, 魏鲁明, 熊志斌. 茂兰喀斯特森林干扰状况与林隙特征. 林业科学, 2005, 41(4):13-19.
- [6] 卢晓强, 方升佐. 黔中喀斯特山地8种树种早期生长和叶片养分动态的研究. 南京林业大学学报, 2008, 1:42-46.
- [8] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社, 2003:136-140.
- [9] 苏维词. 浅议贵州省喀斯特地下水资源及其开发利用模式. 水土保持研究, 2008, 15(6):92-95.
- [10] 刘方, 王世杰, 罗海波, 刘元生, 何腾兵, 龙健. 喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学的影响. 土壤学报, 2006, 43(1):26-32.
- [19] 巩合德, 王开运, 杨万勤. 川西亚高山3种森林群落穿透雨和茎流养分特征研究. 林业科学, 2005, 41(5):14-20.
- [15] 周梅, 余新晓. 兴安落叶松原始林区降水化学输入的特征研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(2):119-121.
- [23] 刘济明. 茂兰喀斯特森林主要树种的繁殖更新对策. 林业科学, 2000, 36(5):114-118.
- [26] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 张雷燕, 刘冲, 刘兴良. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配. 应用生态学报, 2008, 19(9):1871-1876.
- [27] 程根伟, 余新晓, 赵玉淘. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟. 北京:科学出版社, 2004:143-165.