

doi: 10.11707/j.1001-7488.20170401

降水对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤水汽特征的影响*

高德强 徐 庆 张蓓蓓 陈 婕 刘世荣

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 北京 100091)

摘要: 【目的】分析我国南亚热带鼎湖山季风常绿阔叶林土壤水的水分来源、不同强度降水在土壤剖面中的时空运移过程及对各层土壤水的贡献率,为研究降水格局变化下鼎湖山自然保护区森林生态系统水循环过程及区域水资源科学管理等提供科学依据。【方法】利用氘同位素技术,比较不同降水条件下鼎湖山季风常绿阔叶林土壤水 δD 与潜在水源(大气降水、浅层地下水) δD ,阐明土壤水的水分来源和降水在土壤剖面中的时空分布特征;运用二元线性混合模型计算不同强度降水对各层土壤水的贡献率。【结果】鼎湖山季风常绿阔叶林中土壤水 δD 介于大气降水 δD 和浅层地下水 δD 之间,土壤水主要来源于大气降水和浅层地下水;雨后5天内,小雨(9.8 mm)对0~10 cm表层土壤水贡献率最高(31.2%~44.6%),对10~40 cm深处土壤水贡献率次之(24.2%~32.0%),对40~80 cm深处土壤水贡献率较小(8.3%~15.7%),对80~100 cm深层土壤水贡献率最小(接近于0);雨后5天为中雨(20.0 mm)对0~10 cm表层土壤水贡献率最大(63.3%~78.9%),对10~40 cm深处土壤水贡献率次之(46.9%~74.0%),对40~80 cm深处土壤水贡献率较小(37.9%~63.0%),对80~100 cm深层土壤水贡献率最小(35.8%~47.5%);无论湿季还是干季,大雨(降水量>30 mm)后第1天,该次降水可渗透到80 cm以下深层土壤,且对80~100 cm深层土壤水的贡献率高达94.1%。【结论】0~10 cm表层土壤水 δD 与降水 δD 变化趋势一致,林中表层土壤水 δD 主要受降水 δD 的控制;降水强度越大,降水从土壤表层向深层土壤渗透速度越快,对80~100 cm深处土壤水 δD 影响越明显,降水对各层次土壤水的贡献率也越大;土壤剖面中土壤水 δD 的时空变化特征可指示降水在土壤剖面运移过程;无论小雨还是中雨,80 cm以下深层土壤水 δD 变化幅度较小,表明鼎湖山季风常绿阔叶林植被结构对降水在土壤剖面入渗过程具有显著的调控作用。

关键词: 氘同位素; 大气降水; 土壤水; 季风常绿阔叶林; 鼎湖山; 水分来源

中图分类号: S792.17; S792.99; S793.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2017)04-0001-08

Effects of Precipitation on Characteristics of Deuterium Isotope in Soil Water in a Monsoon Evergreen Broad-Leaved Forest in Dinghushan National Nature Reserve

Gao Deqiang Xu Qing Zhang Beibei Chen Jie Liu Shirong

(Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF Beijing 100091)

Abstract: 【Objective】In order to provide scientific evidences for understanding the process of water cycle of forest ecosystem and managing regional water resources under the varying precipitation pattern in Dinghushan National Nature Reserve in the south subtropical zone of China. 【Method】In this study, the δD of soil water and the potential water sources including precipitation and shallow underground water were analyzed to determine the source of soil water and the distribution of different intensity precipitation in the soil profile of the monsoon evergreen broad leaved forest in Dinghushan National Nature Reserve, using deuterium isotope technique. The contribution of precipitation in each layer of the soil profile was calculated by binary linear mixed model. 【Result】The soil water δD was found between those δD values of precipitation and shallow underground water, indicating that precipitation and shallow underground water were the sources of soil water in the monsoon evergreen broad - leaved forest in Dinghushan National Nature Reserve. After a 5 - day small rainfall (9.8 mm), the contribution rate to surface soil layer (0 ~ 10 cm) was the highest (31.2% ~ 44.6%), followed by the layer of 10 ~ 40 cm (24.2% ~ 32.0%) and the soil layer of 40 ~ 80 cm (8.3% ~ 15.7%) , and the soil layer of 80 ~ 100 cm was the lowest, close to zero. With a moderate rainfall event of 20.0 mm, the

收稿日期: 2017-01-09; 修回日期: 2017-03-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31290223 31670720 31170661); 林业公益行业专项(201504423); 院重点基金(CAFYBB2017ZB003)。

* 徐庆为通讯作者。

contribution rate to surface soil (0–10 cm) was the highest (63.3%–78.9%) , followed by the soil layer of 10–40 cm (46.9%–74.0%) and the layer of 40–80 cm (37.9%–63.0%) , and the soil layer of 80–100 cm was the lowest (35.8%–47.5%) . The precipitation infiltrated the deep soil (>80 cm) and the contribution to the soil layer of 80–100 cm under heavy rainfall (>30 mm) was 94.1% during the same day either in the wet season or in the dry season. 【Conclusion】The results showed that δD of surface soil water (0–10 cm) was mainly controlled by rainfall δD . The faster the precipitation moving from the soil surface to the deep soil , the more obvious the effect of soil δD on the depth of 80–100 cm and the greater the rain contribution to the soil water at all levels with increasing the precipitation intensity. Deep soil water (80–100 cm) δD value was basically kept stable under the small rainfall event of ≤ 20 mm. The results illustrated that vegetation structure of the monsoon evergreen broad – leaved forest in. Dinghushan National Nature Reserve played an significant role in regulation of the precipitation infiltration in the soil profile.

Key words: deuterium isotope; precipitation; soil water; monsoon evergreen-broad leaved forest; Dinghushan National Nature Reserve; water source

氢氧稳定同位素是水分子的组成部分 ,通过追踪土壤水氢氧同位素值的时空运动“轨迹” ,可阐明大气 – 植被 – 土壤的关系 ,了解降水在土壤剖面的迁移过程和滞留时间(宋献方等 ,2007; 徐庆等 ,2007; 孙晓旭等 ,2012; 张翔等 ,2015; 马菁等 ,2016)。而且 ,大气降水、土壤水、地下水中的氘同位素(δD)值以及大气降水在土壤剖面中的运移过程 ,可解析土壤水的水分来源及地下水补给机制 对实现区域水资源的合理利用和科学管理具有重要的理论和现实意义(刘君等 ,2016)。

国外土壤水氢氧同位素研究起步较早 ,早在 1967 年 Zimmermann 等(1967) 就利用氘同位素研究了德国吉森壤土和施派尔砂土中非饱和土壤的水分运动。随后 ,一些学者通过研究不同降水强度下土壤水氢氧同位素值 ,提出降水补给土壤水有活塞流和优先流(Zimmermann *et al.* , 1966; Mathieu *et al.* , 1996; Koeniger *et al.* , 2016) 2 种途径 ,且发现小量级的降水能够以优先流的形式快速抵达深层 (Gazis *et al.* , 2004)。在我国 ,对土壤水氘同位素研究较晚 ,但发展较快。有关学者对土壤水氘同位素特征(徐庆等 ,2007; 程立平等 ,2012; 马菁等 ,2016) 、地下水来源(宋献方等 ,2007; 刘君等 ,2016) 、降水 – 土壤水 – 地下水的补给过程(Li *et al.* , 2007; 刘君等 ,2016) 开展了研究 ,徐庆等 (2007) 研究了四川卧龙自然保护区亚高山针叶林 3 种群落的土壤水氘同位素组成 得出川西亚高山原始暗针叶林植被结构对降水在土壤剖面入渗过程具有显著的调控作用(Xu *et al.* , 2012) 。

鼎湖山季风常绿阔叶林是我国南亚热带典型地带性植被演替顶级群落 ,研究其森林生态系统水文过程对于探讨鼎湖山主要森林群落演替动态、森林经营和区域水资源管理皆具有重要意义。前人对鼎

湖山森林水文模型建立(Zhou *et al.* , 2011) 、降水量和地表径流水化学特征(Deng *et al.* , 2012; 丘清燕等 ,2013) 、凋落物持水性及降水对森林土壤呼吸的调节作用(Zhou *et al.* , 2013; 刘效东等 ,2013) 、森林结构变化对森林生态系统水文过程的影响 (Otieno *et al.* , 2014; Li *et al.* , 2007) 等进行了研究 ,但是对鼎湖山森林土壤水中氘同位素示踪研究未见报道。本研究分析鼎湖山季风常绿阔叶林中不同强度降水 δD 及各层土壤水 δD 的时空动态变化 ,定量阐明降水在土壤剖面的运移过程及对不同深度土壤水的贡献率 ,以期为研究降水格局变化下鼎湖山自然保护区森林生态系统水循环过程及区域水资源科学管理等提供科学依据。

1 研究区概况

鼎湖山国家级自然保护区位于我国广东省中部肇庆市境内 ,总面积 1 155 hm² ,最高海拔 1 000.3 m。属典型南亚热带湿润季风气候 ,年均气温 21.0 ℃ ,最热月(7 月) 均气温 28.0 ℃ ,最冷月(1 月) 均气温 12.6 ℃。年均空气相对湿度 81.5% ,年均降水量 1 956 mm ,年均蒸发量 1 115 mm ,全年干湿季明显 ,干季为 10 月至翌年 3 月 ,湿季为 4—9 月 ,其中 3/4 的降水分布在湿季(程静等 ,2015)。研究区属南亚热带地带性植被 ,主要植被类型有马尾松 (*Pinus massoniana*) 针叶林、马尾松针阔叶混交林和季风常绿阔叶林(罗艳等 ,2004)。季风常绿阔叶林是鼎湖山近气候演替顶级群落 ,乔木层代表性植物有锥栗 (*Castanopsis chinensis*) 、木荷 (*Schima superba*) 、厚壳桂 (*Cryptocarya chinensis*) 和云南银柴 (*Aporusa yunnanensis*) ,灌木层代表性植物有九节 (*Psychotria asiatica*) 和柏拉木 (*Blastus cochinchinensis*) 草本层代表性植物有乌毛蕨 (*Blechnum orientale*) 和双盖蕨

(*Diplazium donianum*)。土壤为发育于砂岩或砂页岩的赤红壤, 呈暗棕色, 酸性较强, 土层厚60~100 cm(刘菊秀等, 2003; 吴建平等, 2015)。枯枝落叶厚2~9 cm, 腐殖质层约10 cm, 表土层有机质含量为1.9%~3.3%, pH为4.2~4.5, 土壤孔隙度为55.05%, 土壤密度为1.01 g·cm⁻³(刘效东等, 2011)。

2 研究方法

2.1 降水事件

2013年7月—2014年8月, 鼎湖山自然保护区(112°30'39"~112°33'41" E, 23°09'21"~23°11'30" N)发生多次降水事件, 从中挑选出4次有代表性的降水事件, 均为一次性降水后5天内无雨(降水量<5 mm, 忽略不计), 分别代表小雨(5 mm<降水量≤10 mm)、中雨(10 mm<降水量≤20 mm)和大雨(降水量>30 mm)。降水事件I: 2014年7月27日降水9.8 mm(7月24日为雨前对照); 降水事件II: 2013年9月7日降水20.0 mm(9月6日为雨前对照); 降水事件III: 2013年7月2日降水36.0 mm(6月30日为雨前对照); 降水事件IV: 2013年12月18日降水45.8 mm(12月17日为雨前对照)。

2.2 气同位素样品采集

降水: 2013年7月1日—2014年8月4日, 在鼎湖山季风常绿阔叶林附近a、b、c3个空旷地(a: 112°32'55.43" E, 23°9'54.74" N; b: 112°32'24.75" E, 23°10'25.85" N; c: 112°32'22.34" E, 23°10'25.20" N)分别放置1个雨量筒(每个雨量筒上部各放一漏斗, 每个漏斗中放置1个乒乓球, 以防止水分蒸发), 采集3个雨量筒中的降水样品(每天1次), 每天将3个降水样品混合。采样时间为上午7:00—8:00。

土壤: 在林中设置3块样地(20 m×20 m), 每块样地内各挖1个100 cm深土壤垂直剖面, 在4次降水事件(9.8、20.0、36.0和45.8 mm)期间采集各土壤剖面各土层(0~10、10~40、40~80和80~100 cm)土壤样品; 雨后5天内, 每天采样1次; 雨前采集1天对照样品。采样时间为上午8:00—10:00。

浅层地下水: 采集样地附近水井(112°32'17.38" E, 23°10'33.99" N)中的井水及山脚下水井(112°32'54.70" E, 23°9'58.62" N)中的井水作为浅层地下水, 井深约2 m, 2013年7月—2014年8月, 每隔10天采集1次(无雨时采集, 每天将2个井水样品混合)。

将野外收集的大气降水样品、土壤样品和浅层地下水样品立即装入采样瓶中密封, 迅速拧紧盖子, 并用Parafilm封口膜密封。野外置于保温瓶或保温

箱中低温(0~5 °C)保存, 带回实验室后放入冰箱低温(-18 °C以下)保存, 供测试用。

2.3 样品预处理和气同位素测定

样品预处理: 在清华大学稳定同位素实验室内通过水分真空抽提系统采用蒸发冷却方法提取土壤水。

气同位素测定: 大气降水、土壤水及浅层地下水样品 δD 的测定在清华大学稳定同位素实验室MAT 253 同位素比率质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectrometer)和Flash 2000 HT 元素分析仪上完成。气同位素比值用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)的千分差(‰)表示:

$$\delta D = \left(\frac{R_{SA}}{R_{ST}} - 1 \right) \times 1000 \text{‰}.$$

式中: R_{SA} 和 R_{ST} 分别为样品和 V-SMOW 中的气同位素组成。

2.4 降水对各层土壤水贡献率的计算

通过比较土壤水 δD 与各潜在水源 δD , 可以确定土壤水的水分来源。若确定土壤水来源于某2种水源时, 采用二元线性混合模型确定每一种来源所占比例。当2种水源 δD 不同时, 土壤水 δD 一定介于二者之间。降水对土壤水的贡献率可表示为:

$$P_c = \frac{\delta D_{SW} - \delta D_{SG}}{\delta D_R - \delta D_{SG}} \times 100 \text{‰}.$$

式中: P_c 为降水对土壤水的贡献率; δD_{SW} 、 δD_{SG} 和 δD_R 分别为土壤水、浅层地下水和大气降水 δD (林光辉, 2014)。

2.5 气象数据获取

温度、湿度、降水量等气象数据由鼎湖山自然保护区气象观测站提供。

2.6 数据处理

运用SPSS(SPSS, Inc., Chicago, IL, USA)统计分析软件进行数据处理。单因素方差分析用来检验每次降水事件发生后随采样天数变化各层土壤水 δD 的差异。多因素方差分析用来检验不同强度降水条件下各层土壤水 δD 随采样天数变化和降水对各层土壤水贡献率的影响。

3 结果与分析

3.1 土壤水 δD 随采样时间和土层的动态变化

4次降水事件各层土壤水 δD 随采样天数的动态变化见图1。由图1可知, 在4次降水事件期间, 林中土壤水 δD 均介于降水 δD 与浅层地下水 δD 之间, 表明鼎湖山季风常绿阔叶林土壤水主要来源于大气降水与浅层地下水。

降水 9.8 mm 后 5 天内 $0 \sim 40$ cm 土层土壤水 δD 变化明显 $0 \sim 10$ cm 和 $10 \sim 40$ cm 土壤水 δD 分别由降雨前的 -38.4‰ 和 -39.1‰ 变为降雨后的 -36.7‰ 和 -37.4‰ , 可持续响应 3 ~ 4 天 , 其中表层 ($0 \sim 10$ cm) 土壤水 δD 表现为先升高后降低趋势 , 而 $10 \sim 40$ cm 深处土壤水 δD 则持续降低 ; 40 cm 以下土层土壤水 δD 对降水 δD 的响应不显著 , 尤其是 $80 \sim 100$ cm 深处土壤水 δD 几乎不变 , 表明 9.8 mm 降水并没有渗透到 80 cm 以下土层 (图 1) 。降水 20.0 mm 后 5 天内 $0 \sim 80$ cm 深处土壤水 δD 随降水天数的增加而不断升高 , $80 \sim 100$ cm 深层土壤水 δD 变化幅度不大 , 表明降水渗透到 $0 \sim 80$ cm 土层 , 但较少渗透到 $80 \sim 100$ cm 土层 (图 1) 。湿季 (7 月 2 日) 降水 36.0 mm 后 $0 \sim 10$ cm 表层土壤水 δD 随采样天数的增加而不断升高 , 雨后第 1 ~ 2 天内 , $80 \sim 100$ cm 深层土壤水 δD 缓慢上升 , 后 3 天其 δD 基本上保持稳定 , 表明降水已渗透到 80 cm 深层土壤 (图 1) 。干季 (12 月 18 日) 降水

45.8 mm 后 $0 \sim 100$ cm 土壤水 δD 均随降水天数的增加而不断升高 , 雨后第 1 天 , $0 \sim 40$ cm 深处土壤水 δD 与降水 δD (-104.9‰) 比较接近 $40 \sim 100$ cm 深处土壤水 δD 较雨前也有明显减小 , 表明降水当天已渗透到 100 cm 深层土壤 (图 1) 。

3.2 降水对各层土壤水的贡献率

由图 2 可知 , 在鼎湖山季风常绿阔叶林 4 次降水事件期间 随着土壤深度增加 降水对各层土壤水的贡献率逐渐降低。降水 9.8 mm 后 , 该次降水对 $0 \sim 10$ cm 表层土壤水贡献率最大 ($31.2\% \sim 44.6\%$) , 对 $10 \sim 40$ cm 深处土壤水贡献率次之 ($24.2\% \sim 32.0\%$) , 对 $40 \sim 80$ cm 深处土壤水贡献率较小 ($8.3\% \sim 15.7\%$) , 对 $80 \sim 100$ cm 深层土壤水贡献率最小 ($1.6\% \sim 3.4\%$) ; 降水 20.0 mm 后 , 该次降水对 $0 \sim 10$ cm 表层土壤水贡献率最大 ($63.3\% \sim 78.9\%$) , 对 $10 \sim 40$ cm 深处土壤水贡献率次之 ($46.9\% \sim 74.0\%$) , 对 $40 \sim 80$ cm 深处土壤水贡献率较小 ($37.9\% \sim 63.0\%$) , 对 $80 \sim 100$ cm

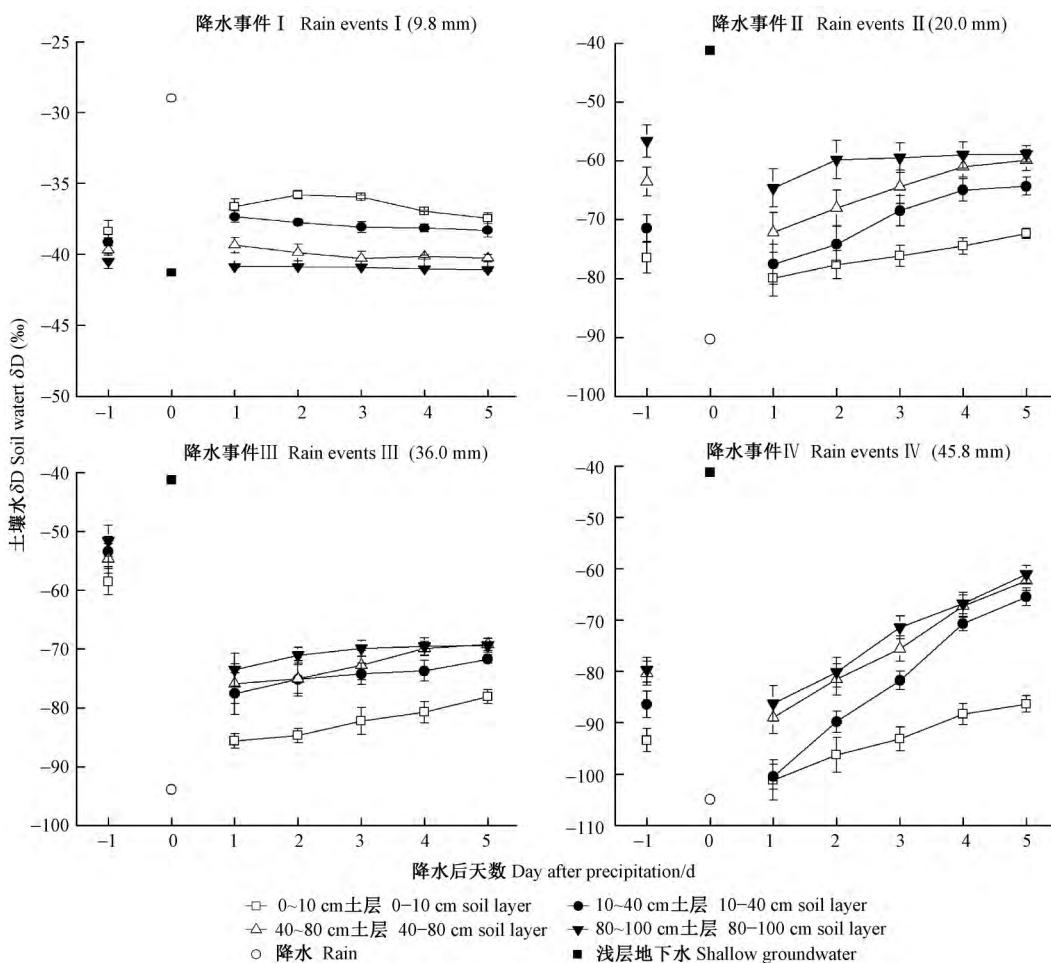


图 1 不同降水条件下土壤水 δD 随采样天数的动态变化

Fig. 1 Temporal changes of δD values of soil water at different depths over the sampling period

深层土壤水贡献率最小(35.8%~47.5%)。在湿季(7月2日),降水36.0 mm后,降水对0~10 cm表层和80~100 cm深层土壤水的贡献率分别为69.9%~84.2%和53.4%~61.3%。在干季(12月18日),降水45.8 mm后,降水对0~10 cm表层和80~100 cm深层土壤水的贡献率分别为70.8%~

94.1%和31.2%~70.7%。

4次降水事件后5天内,土壤水 δD 、降水对各层土壤水贡献率的多因素方差分析结果如表1所示。由表1可知,降水事件(降雨量大小)是影响土壤水 δD 、降水对各层土壤水贡献率的主要影响因子($P < 0.01$)。

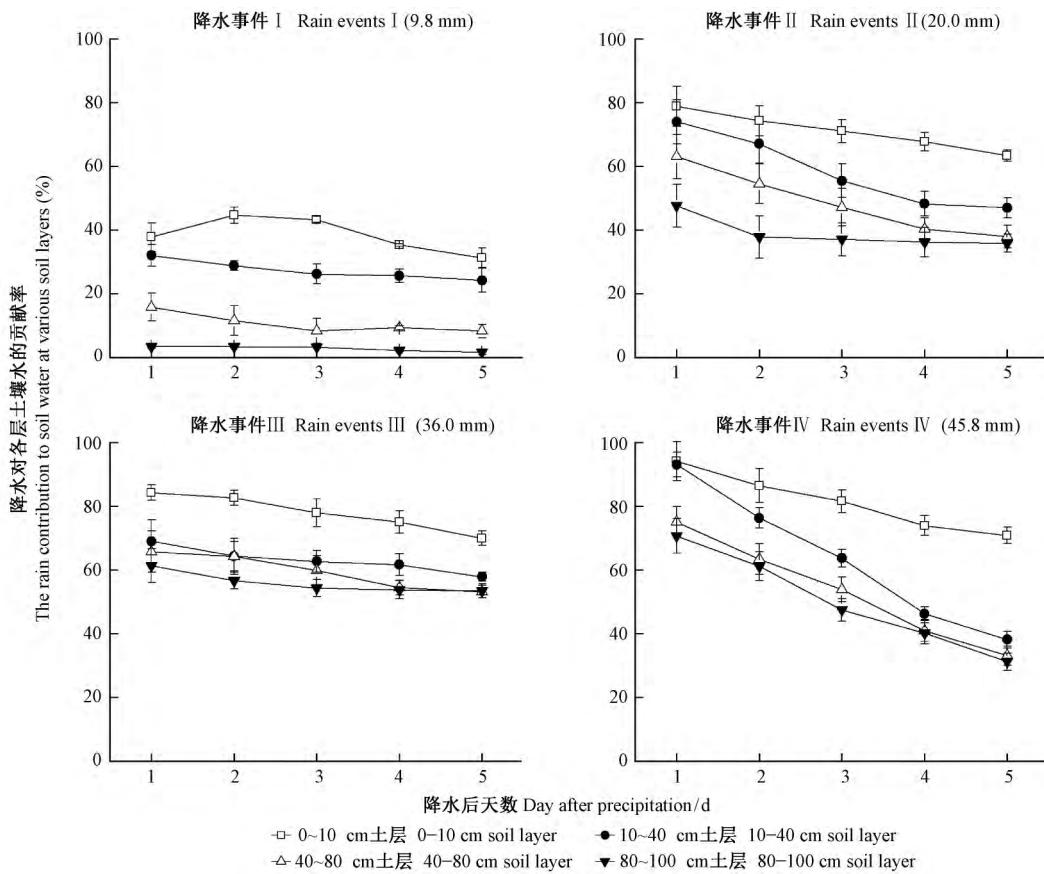


图2 降水对各层土壤水的贡献率随采样时间的动态变化

Fig. 2 Temporal changes of the contribution of precipitation to soil water at various soil layers over the sampling period

表1 土壤水 δD 、降水对各层土壤水贡献率与土壤层次、降水事件和采样天数的关系

Tab. 1 Effects of soil layer, rain event, and day of rain on the stable isotope rate

(δD) of soil water and the rain contribution to soil water in monsoon evergreen broad-leaved forest in

Dinghushan National Nature Reserve

项目 Item	df	土壤水 δD			降水对各层土壤水贡献率		
		SSE	F	Sig.	SSE	F	Sig.
土壤层次 Soil layer	3	3 937.00	211.02	< 0.01	31 569.84	452.01	< 0.01
降水事件 Rain event	3	62 304.23	3 339.46	< 0.01	76 458.30	1 094.72	< 0.01
采样天数 Day	4	3 166.84	127.30	< 0.01	11 587.14	124.43	< 0.01
土壤层次 \times 降水事件 Soil layer \times rain event	9	3 076.01	54.96	< 0.01	1 794.28	8.56	< 0.01
土壤层次 \times 采样天数 Soil layer \times day	12	203.15	2.72	< 0.01	789.90	2.83	< 0.01
降水事件 \times 采样天数 Rain event \times day	12	2 885.52	38.67	< 0.01	5 248.08	18.79	< 0.01
土壤层次 \times 降水事件 \times 采样天数 Soil layer \times rain event \times day	36	392.13	1.75	> 0.01	1 235.37	1.47	> 0.01

4 讨论

4.1 土壤水的水分来源

在鼎湖山季风常绿阔叶林,无论小雨、中雨,还是大雨,土壤水 δD 皆介于降水 δD 和浅层地下水 δD 之间,表明其林中土壤水主要来源于大气降水和浅层地下水(图1),刘文杰等(2006)研究发现西双版纳热带雨林浅层土壤水主要来源是雾水和雨水,徐庆等(2007)研究发现川西卧龙亚高山暗针叶林土壤水主要来源于降水和浅层地下水,与本研究的结论相一致;就气候条件而言,鼎湖山和卧龙地区均属于典型亚热带季风气候区,二者气候条件相似,干湿季明显。

4.2 土壤水 δD 随采样时间及土层的动态变化

鼎湖山季风常绿阔叶林 0~10 cm 表层土壤水 δD 主要受降水 δD 控制,与徐庆等(2007)、Xu 等(2012)研究结果一致,沿土壤剖面由上向下,0~10 cm 表层土壤水 δD 与降水 δD 接近,10~80 cm 深处土壤水 δD 随采样天数增加变化幅度增大,80 cm 以下深处土壤水 δD 与浅层地下水 δD 接近(王锐等,2014)。随土层深度增加,土壤水 δD 波动幅度越来越小,当降水 ≤ 10 mm 时,80~100 cm 深处土壤水 δD 基本趋于稳定,可见小于 10 mm 的降水对林中 80 cm 以下深处土壤水的补给较少,这在一定程度上说明,在鼎湖山季风常绿阔叶林中,植被结构和土壤结构对降水在沿土壤剖面下渗过程具有一定调控作用。

4.3 降水在土壤剖面的垂直迁移运动

土壤水 δD 的时空动态变化特征受当次降水 δD 和降水量大小的影响,而降水 δD 对土壤水 δD 和渗透量的影响又取决于降水和蒸发的强度(Xu et al., 2012)。表层土壤水 δD 受蒸发和前期降水的综合影响,而随着土层深度增加,土壤水蒸发速率降低(Gazis et al., 2004)。40 cm 以下土壤很少受蒸发的影响(Jia et al., 2013),主要受前期降水(Song et al., 2009)和浅层地下水(Xu et al., 2012)影响。深层土壤常保留着前期降水,本次降水从地表向地下渗透的过程中并没有完全替换土壤中保留的前期降水(田立德等,2002; 徐庆等,2007; Xu et al., 2012)。同等降水强度下,随着土层深度增加,这种替换速度越来越慢,降水对该层土壤水的影响作用越来越小(图1)。无论干季还是湿季,降水强度越大,置换速度越快,降水对深层(80~100 cm)土壤水的影响越明显(图1c、图1d)。

本研究发现,当降水 ≤ 10 mm 时,鼎湖山季风常

绿阔叶林中 0~80 cm 深处土壤水 δD 在垂直方向上变化幅度较大,而 80~100 cm 深处土壤水 δD 变化幅度小,较稳定,这主要是因为表层土壤水同位素值的变化受蒸发和混合作用共同影响,而深层土壤水 δD 的改变仅由混合作用引起,与周海等(2014)、Xu 等(2012)结论相一致。降水在土壤剖面入渗主要通过活塞流和优先流 2 种途径来补给土壤水(Mathieu et al., 1996; Xu et al., 2012)。降水 ≤ 10 mm 时,雨后形成的土壤“新水”逐渐替代先形成的土壤“旧水”并将其向下推移,土壤水 δD 随采样时间动态变化过程体现了活塞式下渗的特征(Gazis et al., 2004); 降水 > 10 mm 时,土壤水 δD 随土层深度发生的递增变化说明降水主要通过优先流的方式向下入渗(Germann et al., 1984)。土壤水 δD 变化受大气降水、地表蒸发、土壤水的水平迁移和垂直运动、土壤结构、植被类型以及人类活动等多种因素的影响(马雪宁等,2012; 程立平等,2012),因此,通过对比不同降水条件下不同深度土壤水 δD 变化可以获得土壤水分垂直迁移运动机制的有效信息(Gazis et al., 2004; Song et al., 2009; Xu et al., 2012),从而确定降水在土壤剖面的垂直迁移运动过程规律及地下水补给路径(Mathieu et al., 1996; Brooks et al., 2009; Xu et al., 2012)。

4.4 降水对各层土壤水的贡献率

本研究发现,无论小雨、中雨还是大雨,降水对 0~10 cm 表层土壤水贡献率最大。20 mm 降水后 5 天内,对 0~10 cm 表层土壤水贡献率是 9.8 mm 降水的 2 倍左右,可见天然降水量双倍增加,降水对表层土壤水的贡献率也成双倍增加。而 20 mm 降水对 80~100 cm 深处土壤水贡献率远大于 9.8 mm,这是因为 9.8 mm 降水并没有渗透到 80 cm 以下深层土壤。

同一降水强度下(如降水 > 30 mm),降水对土壤水的影响程度随土层深度的增加而降低;随着采样天数的推移,降水对各层土壤水的贡献率逐渐降低。降水强度越大,降水能够影响到的土壤深度增大,降水对各层土壤水的贡献率越高。徐庆等(2007)发现,一次性降水 14.8 mm 后 5 天内,降水对亚高山暗针叶林枯枝落叶层和 0~5 cm 土壤水的贡献率较高,分别为 75.5%~99.9% 和 66.9%~83.0%。本研究 4 次强度降水对表层(0~10 cm)土壤水的贡献率较高,其中 20.0 mm 降水发生后 5 天内,降水对表层土壤水的贡献率显著低于降水对亚高山暗针叶林中枯枝落叶层和 0~5 cm 土壤水的贡献率,这是因为鼎湖山季风常绿阔叶林对降水在地

表及土壤剖面入渗的调控作用大于川西亚高山暗针叶林。可见,植被类型对降水在土壤中的入渗过程有重要作用,降水对各层土壤水贡献率的变化规律也能很好地记录降水从土壤表层向深层入渗的过程(李晖等,2008; Xu et al., 2012)

5 结论

1) 鼎湖山季风常绿阔叶林0~10 cm 表层土壤水 δD 与降水 δD 变化趋势一致,其表层土壤水 δD 主要受大气降水 δD 控制。

2) 降水强度越大,降水从土壤表层向深层土壤渗透速度越快,对80~100 cm 深处土壤水 δD 影响越明显,降水对土壤水的贡献率也越高;随采样天数的推移,深层土壤水 δD 变化幅度和降水对土壤水的贡献率均降低。

3) 不同降水条件下不同深度土壤水 δD 的空间分布形式反映了降水在土壤剖面的运移过程,小雨(5 mm < 降水量 ≤ 10 mm)后,80 cm 以下深层土壤水 δD 几乎保持稳定,表明鼎湖山季风常绿阔叶林植被结构对降水在土壤剖面入渗过程具有一定调控作用。因此,在评估全球气候变化(尤其是降水格局变化)条件下南亚热带森林生态系统水文生态效益时,应充分考虑其林中植被结构对土壤水分运移过程的影响。

参 考 文 献

程 静,欧阳旭,黄德卫,等. 2015. 鼎湖山针阔叶混交林4种优势树种树干液流特征. 生态学报, 35(12): 4097~4104.

(Cheng J , Ouyang X , Huang D W , et al. 2015. Sap flow characteristics of four dominant tree species in a mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica* , 35(12): 4097~4104. [in Chinese])

程立平,刘文兆. 2012. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征. 应用生态学报, 23(3): 651~658.

(Cheng L P , Liu W Z . 2012. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 23(3): 651~658. [in Chinese])

李 晖,蒋忠诚,周宏飞,等. 2008. 准噶尔盆地降水、土壤水和地下水 $\delta^{18}O$ 和 δD 变化特征——以中国生态系统研究网络阜康站为例. 水土保持研究, 15(5): 105~108.

(Li H , Jiang Z C , Zhou H F , et al. 2008. Variation characteristics of oxygen and hydrogen stable isotope in precipitation, soil water and groundwater in the Junggar Basin——taking Fukang station of desert ecology as a case. *Research of Soil and Water Conservation* , 15(5): 105~108. [in Chinese])

林光辉. 2013. 稳定同位素生态学. 北京: 高等教育出版社.

(Lin G H . 2013. Stable isotope ecology. Beijing: Higher Education Press. [in Chinese])

刘菊秀,周国逸,张德强. 2003. 酸雨对鼎湖山土壤的累积效应及荷木的反应. 中国环境科学, 23(1): 90~94.

(Liu J X , Zhou G Y , Zhang D Q . 2003. The cumulative effects of acid rain on the soil and responses of *Schima superba* at Dinghushan. *China Environmental Science* , 23(1): 90~94. [in Chinese])

刘 君,聂振龙,段宝谦,等. 2016. 氢氧稳定同位素指示的呼和浩特地区土壤水的补给特征. 干旱区资源与环境, 30(10): 145~150.

(Liu J , Nie Z L , Duan B Q , et al. 2016. Characteristics of stable isotope (δ^2H and $\delta^{18}O$) in soil water in Hohhot area. *Journal of Arid Land Resources and Environment* , 30(10): 145~150. [in Chinese])

刘文杰,李鹏菊,李红梅,等. 2006. 西双版纳热带季节雨林林冠截留雾水和土壤水的关系. 生态学报, 26(1): 9~15.

(Liu W J , Li P J , Li H M , et al. 2006. Fog interception and its relation to soil water in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica* , 26(1): 9~15. [in Chinese])

刘效东,乔玉娜,周国逸,等. 2011. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用. 植物生态学报, 35(12): 1209~1218.

(Liu X D , Qiao Y N , Zhou G Y , et al. 2011. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability. *Chinese Journal of Plant Ecology* , 35(12): 1209~1218. [in Chinese])

刘效东,周国逸,张德强,等. 2013. 鼎湖山流域下游浅层地下水动态变化及其机理研究. 生态科学, 32(2): 137~143.

(Liu X D , Zhou G Y , Zhang D Q , et al. 2013. Dynamic features and mechanisms of shallow groundwater in the downstream of Dinghushan Biosphere Reserve. *Ecological Science* , 32(2): 137~143. [in Chinese])

罗 艳,周国逸,张德强,等. 2004. 鼎湖山三种主要林型水文学过程中总有机碳浓度对比. 生态学报, 24(12): 2973~2978.

(Luo Y , Zhou G Y , Zhang D Q , et al. 2004. Study on the concentration of total organic carbon in the forest hydrological processes of three main forest types in Dinghushan during a rain season. *Acta Ecologica Sinica* , 24(12): 2973~2978. [in Chinese])

马 菁,宋维峰,吴锦奎,等. 2016. 元阳梯田水源区林地降水与土壤水同位素特征. 水土保持学报, 30(2): 243~248.

(Ma J , Song W F , Wu J K , et al. 2016. Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes of precipitation and soil water in woodland in water source area of Yuanyang Terrace. *Journal of Soil and Water Conservation* , 30(2): 243~248. [in Chinese])

马雪宁,张明军,李亚举,等. 2012. 土壤水稳定同位素研究进展. 土壤, 44(4): 554~561.

(Ma X N , Zhang M J , Li Y J , et al. 2012. Research advances on stable isotopes in soil water. *Soils* , 44(4): 554~561. [in Chinese])

丘清燕,陈小梅,梁国华,等. 2013. 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响. 生态学报, 33(13): 4021~4030.

(Qiu Q Y , Chen X M , Liang G H , et al. 2013. Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica* , 33(13): 4021~4030. [in Chinese])

宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 2007. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(1): 102-110.

(Song X F , Liu X C , Xia J , et al. 2007. An analysis of the surface water and groundwater conversion relationship in Huaisha river basin based on environmental isotope technique. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* , 37(1) : 102 - 110. [in Chinese])

孙晓旭, 陈建生, 史公勋, 等. 2012. 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律. *农业工程学报*, 28(4): 100-105.

(Sun X X , Chen J S , Shi G X , et al. 2012. Hydrogen and oxygen isotopic variations of different water bodies in evaporation and rainfall infiltration processes. *Transactions of the CSAE* , 28(4) : 100 - 105. [in Chinese])

田立德, 姚檀栋, Tsujimura M , 等, 2002. 青藏高原中部土壤水中稳定同位素变化. *土壤学报*, 39(3): 289-295.

(Tian L D , Yao T D , Tsujimura M , et al. 2002. Stable isotope in soil water in the middle of Tibetan Plateau. *Acta Pedologica Sinica* , 39 (3) : 289 - 295. [in Chinese])

王锐, 刘文兆, 宋献方. 2014. 黄土塬区土壤水分运动的氢氧稳定同位素特征研究. *水土保持学报*, 28(3): 134-137.

(Wang R , Liu W Z , Song X F. 2014. Study on soil water dynamics on Loess Tableland based on stable hydrogen and oxygen isotopes. *Journal of Soil and Water Conservation* , 28(3) : 134 - 137. [in Chinese])

吴建平, 梁国华, 熊鑫, 等. 2015. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应. *生态学报*, 35(20): 6686-6693.

(Wu J P , Liang G H , Xiong X , et al. 2015. Effects of simulated acid rain on soil microbial biomass carbon and total organic carbon in a monsoon evergreen broadleaved forest at the Dinghushan Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica* , 35 (20) : 6686 - 6693. [in Chinese])

徐庆, 刘世荣, 安树青, 等. 2007. 四川卧龙亚高山暗针叶林土壤水的氢稳定同位素特征. *林业科学*, 43(1): 8-14.

(Xu Q , Liu S R , An S Q , et al. 2007. Characteristics of hydrogen stable isotope in soil water of sub - alpine dark coniferous forest in Wolong , Sichuan Province. *Scientia Silvae Sinicae* , 43(1) : 8 - 14. [in Chinese])

张翔, 邓志民, 潘国艳, 等. 2015. 鄱阳湖湿地土壤水稳定同位素变化特征. *生态学报*, 35(22): 7580-7588.

(Zhang X , Deng Z M , Pan G Y , et al. 2015. Variation in stable isotope composition in soil water in Poyang Lake Wetland. *Acta Ecologica Sinica* , 35 (22) : 7580 - 7588. [in Chinese])

周海, 郑新军, 唐立松, 等. 2014. 盐生荒漠土壤水稳定氢、氧同位素组成季节动态. *中国沙漠*, 34(1): 162-169.

(Zhou H , Zheng X J , Tang L S , et al. 2014. Analysis on seasonal dynamics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in soil water at a saline desert site in the southeastern Junggar Basin. *Journal of Desert Research* , 34(1) : 162 - 169. [in Chinese])

Brooks J R , Barnard H R , Coulombe R , et al. 2009. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a mediterranean climate. *Nature Geoscience* , 3(2) : 100 - 104.

Deng Q , Hui D F , Zhang D Q , et al. 2012. Effects of precipitation increase on soil respiration: a three-year field experiment in subtropical forests in China. *Toxicology & Industrial Health* , 7(9) : 777 - 784.

Gazis C , Feng X. 2004. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma* , 119 (1/2) : 97 - 111.

Germann P F , Edwards W M , Owens L B. 1984. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores1. *Journal of the Soil Science Society of America* , 48(2) : 237 - 244.

Jia G , Yu X , Deng W. 2013. Seasonal water use patterns of semi-arid plants in China. *Forestry Chronicle* , 89(2) : 169 - 177.

Koeniger P , Gaj M , Beyer M , et al. 2016. Review on soil water isotope-based groundwater recharge estimations. *Hydrological Processes* , 30 (16) : 1 - 18.

Li F D , Song X F , Tang C Y , et al. 2007. Tracing infiltration and recharge using stable isotope in Taihang Mt. , North China. *Environmental Geology* , 53(7) : 687 - 696.

Li R H , Zhu S D , Chen H Y H , et al. 2015. Are functional traits a good predictor of global change impacts on tree species abundance dynamics in a subtropical forest?. *Ecology Letters* , 18 (11) : 1181 - 1189.

Mathieu R , Bariac T. 1996. An isotopic study (^2H and ^{18}O) of water movements in clayey soils under a semiarid climate. *Water Resources Research* , 32(2) : 779 - 790.

Otieno D , Li Y L , Ouyang X , et al. 2014. Stand characteristics and water use at two elevations in a sub-tropical evergreen forest in southern China. *Agricultural & Forest Meteorology* , 194(3) : 155 - 166.

Song X F , Wang S Q , Xiao G Q , et al. 2009. A study of soil water movement combining soil water potential with stable isotopes at two sites of shallow groundwater areas in the North China Plain. *Hydrological Processes* , 23(9) : 1376 - 1388.

Xu Q , Liu S R , Wan X C , et al. 2012. Effects of rainfall on soil moisture and water movement in a subalpine dark coniferous forest in southwestern China. *Hydrological Processes* , 26 (25) : 3800 - 3809.

Zhou G Y , Peng C H , Li Y L , et al. 2013. A climate change-induced threat to the ecological resilience of a subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Southern China. *Global Change Biology* , 19 (4) : 1197 - 1210.

Zhou G Y , Wei X H , Wu Y P , et al. 2011. Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China. *Global Change Biology* , 17(12) : 3736 - 3746.

Zimmermann U , Münnich K , Roether W. 1967. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes. *Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle* , 11: 28 - 36.

Zimmermann U , Münnich K O , Roether W , et al. 1966. Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration. *Science* , 152(3720) : 346 - 347.

(责任编辑 于静娴)