

栓皮栎林分枯落物对土壤—植物系统 水分运动的影响

王伟伟

(中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘要: [目的] 分析枯落物层对森林生态系统水分循环的作用。[方法] 利用稳定同位素技术, 测定了在旱季和雨季栓皮栎木质部水分以及枯落物层和不同土壤层水分的同位素特征。通过对比不同环境条件下(干旱期和降雨前后)枯落物层和土壤水分同位素组成的变化, 并根据其与植物茎水分同位素特征的差异判断栓皮栎不同季节的水分利用来源。[结果] 在旱季, 随着干旱期的进行, 对于平均枯落物层厚度, 表层 0—30 cm 土壤水分同位素特征由于蒸发分馏的影响逐渐变得富集, 而对于因为特殊地形而造成的未分解枯落物层较厚的地方, 则土壤水分同位素特征随着干旱期的进行几乎不发生变化; 栓皮栎的水分来源主要集中在表层, 随着干旱期的延长没有发生变化; 在雨季, 极端降雨后, 土壤同位素特征表明枯落物截留降雨的效应明显, 被枯落物截留的雨水以活塞流的形式继续向土壤入渗, 栓皮栎的水分来源主要来自于表层 0—10 cm 枯落物层(分解层)的土壤; 土壤剖面水分同位素特征呈现的梯度变化与土壤层的结构有关。[结论] 枯落物层的厚度, 特别是未分解层, 对土壤水分的同位素特征影响有差异; 枯落物层的水文效应也间接改变了植物的水分利用。

关键词: 枯落物; 稳定同位素; 土壤水分; 水分利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)03-0105-07

中图分类号: S715-3

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.025

Effects of Litters in Cork Oak Stands on Water Movement of Soil—Plant System

WANG Weiwei

(China Railway Fifth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: [Objective] To analyze the effects of litter layer on forest ecosystem moisture cycle. [Methods] Using stable isotope techniques to measure the moisture in *Quercus* xylem in dry and wet seasons, and the isotopic characteristics of the litter layer and different soil moisture layers. By contrasting the changes of the composition of litter layer and soil moisture isotopes under different environmental conditions which including before and after periods of drought and rainfall, and based on the differences between the changes and the isotopic characteristics of plant stem moisture, the differences in different seasons of cork oak were estimated. [Results] Firstly, as the drought continues, due to evaporation fractionation gradually, the isotopic characteristics of moisture in surface soil of 0—30 cm become enriched for the average thickness of the litter layer, and the isotopic characteristics of soil moisture almost did not change for the thick undecomposed litter layer caused by special topography. The moisture source of cork oak concentrated mainly in the surface water, and did not change with the drought. Secondly, after extreme rainfall during the rainy season, soil isotopic characteristics indicated litter interception rainfall effect was obvious, the rainwater which was trapped by litter infiltrated to soil in the form of plug flow continuously, the main source of moisture of *Quercus* come from the surface 0—10 cm layer of soil litter decomposition layer. Thirdly, moisture gradient isotopic characteristics of the soil profile was related to the structure of the soil layer. [Conclusion] There are differences in the effects of litter layers' thickness on soil moisture isotopic characteristics, especially which of unde-

收稿日期: 2014-04-01

修回日期: 2014-05-05

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“三北地区水源涵养林体系构建技术研究和示范”(2011BAD38B05)

第一作者: 王伟伟(1987—), 男(汉族), 山西省临汾市人, 硕士研究生, 研究方向为森林水文及同位素水文。E-mail: wangweiwei1987411@163.com。

composed layer. The hydrological effects of litter in cork oak stands change the plant water use indirectly.

Keywords: litters; stable isotope; soil moisture; water use

森林枯落物层是森林生态系统的重要组成部分,是森林水文效应的第二活动层^[1-2],不但具有截持降水、减少侵蚀、阻延地表径流、补充土壤水分的作用,而且能够影响土壤营养元素的循环、植物的水分利用和组成以及能够抑制土壤水分蒸发,是植物群落涵养水源、保持水土的主要功能层次,在土壤—植被—大气连续体中起着重要的作用^[3-5]。而枯落物的这些水文功能与其种类、储量、分解程度、分布格局及其持水能力有密切的关系^[6]。

在旱季,枯落物抑制土壤水分蒸发的作用对于干旱半干旱区土壤水分活性的维持具有重要的作用。周宏伟^[7]在塔克拉玛干沙漠腹地进行人工模拟 4 种不同覆盖物,包括积沙层、盐结皮层、枯落物和积沙—枯落物混合层对土壤水分蒸发的影响,发现这些覆盖物相对于无覆盖物沙地,蒸发抑制作用明显,而且随着覆盖物厚度的增加蒸发抑制效率增加明显,枯落物的最大蒸发抑制率高达 78.96%,现实蒸发抑制效率为 61.74%。申卫军^[8]在分析马占相思和湿地松人工林枯落物层的水文生态功能时,也发现枯落物层减少土壤水分蒸发的效应随枯落物层厚度和土壤含水量的增大而增加,同时 2 种枯落物对径流留出时间的阻滞效应随枯落物层厚度的增加呈直线增加。枯落物层的截留作用也是枯落物层生态水文效应的一个重要的方面,通过林冠层后的降水到达地表时,枯落物层再次截留部分降水或延缓入渗,从而改变水文过程和水文效应^[9]。枯落物层对降水的截留是一个从开始截留降雨到吸水饱和的过程,可分为截留、渗透直至达到最大(饱和),截留率逐渐减小。李海军^[10]在研究天山中部不同林龄天然云杉林地表层土壤入渗性能中分析了枯落物层对土壤入渗性能的影响,得出初渗速率与枯落物层的厚度呈极显著正相关,枯落物层越厚,地表入渗空隙越大,水分下渗速率越快。汪邦稳^[11]研究枯落物对降雨径流分配的影响发现:枯落物覆盖能够有效改善降雨径流的垂直空间分配,使得地表径流减少,壤中流和基流显著增加。另外,森林凋落物的分解还是森林生态系统中有机质残体分解转化的基本过程,是系统养分循环的关键环节,对调节土壤养分的可利用性和维持森林的生产力具有重要的作用。凋落物在自然条件下,凋落物的自然持水率是影响凋落物分解重要因素之一,凋落物的分解速率随凋落物自然持水率的升高而增加^[12],而这将进一步存进植物的生长和生态系统生产力的提高。

水的稳定同位素成分被认为是水的“指纹”,记录了大量综合反映个系统地球化学过程、联系各环节成分特点的环境信息^[13],在土壤—植物—大气连续体中,其分布特征反应了一定范围内的水分循环过程及植物对不同水源的选择利用能力等^[14]。土壤水中的稳定同位素变化受大气降水中稳定同位素以及地表蒸发、水分在土壤中的水平迁移和垂直运动等多种因素的影响,因此可以将土壤水中的稳定同位素成分作为一种天然的示踪剂利用其浓度变化提取有关水在土壤中的迁移、分配的信息^[15]。程立平^[16]研究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时发现不同土地利用方式之间土壤水同位素值随土壤深度增加而趋于一致;相同土地利用条件下,浅层土壤水同位素组成随时间推移而变化的程度剧烈,随土壤深度增加,土壤水同位素值的变化程度减弱,甚至无变化;而且通过对比降水与土壤水同位素值变化发现,在黄土塬区,活塞流和优先流并存于降水入渗的过程中。王仕琴^[17]利用同位素研究不同降水特征、土壤质地和植被条件下的入渗过程的差异性,发现土壤非均质条件下,降水入渗补给过程伴随着蒸发、植被蒸腾作用以及与土壤前期水分的强烈混合作用,活塞流入渗的同时土壤 100 cm 深度可能还存在大孔隙优先流,而土壤均质条件下降水均匀入渗,土壤水基本以活塞流为主的形式运动。

本文利用稳定同位素技术,通过对枯落物、土壤和植物茎干水分的氢氧同位素特征的测定,以期了解枯落物层水文效应对土壤—植物系统水分运动的影响。

1 研究区概况

试验地位于鹫峰国家森林公园内的北京林业大学教学实验林场,北京市西北郊,太行山系最北端和燕山山脉相会的地方,北纬 40°3'46",东经 116°5'45",属于华北暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区,年平均气温 8.5~9.5℃,最高气温 39.7℃,最低气温 -19.6℃,≥10℃有效积温 3 385~4 210℃,无霜期 150 d,晚霜于 4 月上旬,早霜于 9 月上旬,多年平均降水量 600~700 mm,季节性差异明显,多集中在 7—9 月份,占全年降水量的 70%以上。植物生长期 220 天。春季干旱多风,昼夜温差大,降水占全年降水的 8%左右,而蒸发量很大,很容易造成春旱,夏季炎热多雨,降水集中,秋季冷暖适宜,冬季寒冷干燥,

降水量占全年的2%左右。由于自元代以后森林不断被破坏到清朝末期植被已退化成灌丛和灌草丛,以及少量的次生林和草甸植被等。20世纪以来,由于人类经济活动频繁,仅存的少部分森林也遭受到砍伐,原生植被破坏殆尽。自20世纪50年代到60年代开始,北京市开展了大规模的人工造林,使北京低山区森林不断恢复,现在已有侧柏、栓皮栎、油松、刺槐等片状的人工林分。

由于自然(地形、降雨、地面物质组成和植被)和人为因素(开荒、过度放牧、工矿交通)影响,北京地区水土流失严重,早在20世纪50年代北京山区就已经开展水土保持工作^[18],研究区仍然能够看到一些坡面水土保持工程措施(干砌片石护坡,水平阶),特别是在低山区,这些措施可以拦蓄径流、沉淀泥沙,改善侵蚀和水分循环环境,为植树造林和植被恢复创造了良好的条件^[19]。

试验样地海拔400 m左右,北纬40°03',东经116°05',坡度7.5°,坡向南偏东45°,样地规格40 m×60 m,样地林分为轻度混交林,主要乔木为侧柏和栓皮栎,林下代表灌木为荆条、孩儿拳头,栓皮栎为优势树种,单木优势度非常明显,其他伴生树种几乎都为被压木和中庸木,林分密度为1 294株/hm²,建群种比率为58%,平均胸径为16.2 cm,平均树高为10.9 m,郁闭度0.85,平均树龄为53 a。在样地坡面选择2个采样点,采样点分别位于坡下(SPL1,海拔370 m)和坡中(SPL2,海拔397 m),母质为凝灰岩坡积物,由于水土保持工程的原因,土壤层厚度在60 cm左右,黏壤土,碎块状结构,在0—60 cm土壤层内石砾含量极少,而在60 cm以下石砾含量开始增多,并出现灰白色的风化凝灰岩,土壤层颜色变化明显。由于栓皮栎枯落物量较大,在前一年落叶后,由于冬春季节温度、水分含量较低,分解速度慢,主要分解期集中在雨季和雨季后期,所以采样期内土壤表层有一定厚度的枯落物层,且未分解层和半分解层以及分解层明显,根据采样点位置的差异,枯落物层的厚度也有差异,因为北京冬春季多风,导致坡下一般会积累较厚的枯落物层。通过在坡面不同位置采样,分析枯落物层对土壤、植物茎干水分同位素特征的影响。

2 试验方法

2.1 样品采集

枯落物层样品的采集并未按照其分解程度进行采集,而是整体采集(半分解层居多),土壤样品通过1 m的土钻,上层0—40 cm土壤每10 cm分层取样,随即每20 cm取样,一直到风化基岩层(一般在70

cm左右)。样品装入50 ml的塑料离心管中(带螺纹口),并用parafilm密封,带回实验室冷冻保存。

(1) 植物样品采集。在土壤采样点附近,选取2株成熟的栓皮栎植株,每株一个样品,剪取非绿色的栓化小枝,去皮后迅速放入采样瓶内,用parafilm膜密封,带回实验室冷冻保存。

(2) 降水样品的采集方法:降水样品采集地点位于距离试验样地200 m,海拔120 m和153 m的空旷地,放置2个铁质收集桶,四周没有树木和建筑物,收集桶的上方放置塑料漏斗且在漏斗里放置一个乒乓球,防止桶内的水分蒸发分馏。将收集的降水样品放入100 ml的塑料试管中,并立即用parafilm密封,带回实验室放入冰箱中冷藏。

2.2 样品室内分析

样品的室内分析在北京林业大学水土保持重点实验室进行,利用低温真空蒸馏(LI-2000植物土壤水分真空抽提系统)的方法提取植物和土壤的水分(Ehleringer et al 2000),激光液态水同位素分析仪(Los Gatos Research)应用偏轴积分腔输出光谱的方法,可以在25 cm的腔室中产生大约2 500 m的光路,不同的水分子在这样的光腔中有区分明显的吸收峰,某种分子的绝对数量可以通过测量某种特定波长激光的吸收状况得到^[20],对水分样品同位素丰度 $\delta D, \delta^{18}O$ 值进行测定,其 $\delta D, \delta^{18}O$ 的测定精度分别达到0.3‰和0.1‰。测得的植物和土壤水样中氢氧同位素含量为“与标准平均大洋水(SMOW)”的千分差,表示为:

$$\delta = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000\%$$

式中: R_{sample} ——水样中D或¹⁸O的浓度; R_{standard} ——SMOW中D或¹⁸O的浓度。

3 结果分析

3.1 降雨分布和降雨、植物茎干水分的同位素特征

由图1可知,在2013年试验区的降雨分布呈现出明显的旱季和雨季的分界,在五月底(0527—0528)近10 mm的降雨后正式进入雨季,而之前(旱季)仅仅只有近30 mm的降水,第1次采样前(0503)实验区有近一个月的无降雨日,到第2次采样(0525)时干旱期延长,近50 d的无降雨日。而在雨季降雨频繁且连续,同时伴随有极端降雨事件,在6—7月间有3次降雨事件降雨量分别达到42.8,45.6,51.2 mm。收集最近1次(20130715)极端降雨样品,并在降雨后1 d(20130716)和5 d(20130720)采集土壤和植物样品,期间无降雨事件发生。

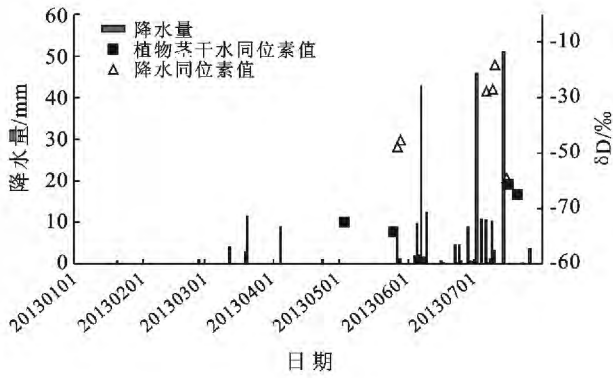


图 1 采样期内降雨的分布和降雨和栓皮栎水分同位素特征

根据植物茎的氧同位素特征,干旱期相较于湿润期,植物茎水的同位素值偏小,同时随着干旱期的延长,植物茎水的同位素值逐渐减小,这可能与栓皮栎的水分利用策略有关,在干旱期,水分来源的深度较湿润期深,而且随着干旱期的延长,水分利用的深度会逐渐加深。而在湿润期,长时间持续降雨后,植物茎水的同位素值与最近的极端降雨同位素值接近,而之前的小降雨事件的对植物茎水同位素特征几乎没有影响,在雨季极端降雨的同位素特征对栓皮栎的水分同位素特征起决定作用,在经过近 5 d 的无降雨

后,茎干水分同位素特征变化微弱(-6.97%, -7.21‰)。

3.2 枯落物层的水文效应对土壤剖面的水分同位素特征的影响

在干旱期的第 1 次采样(20130503),同位素特征的变化如图 2 所示。无论坡下还是坡中枯落物层和土壤表层的水分同位素特征,由于长期蒸发的影响,呈现出明显的梯度变化,从枯落物层开始,随着土壤深度的增加,水分同位素特征先逐渐减小,然后趋于稳定;在坡下这个拐点出现在 20 cm 深度处,而在坡中这个拐点的更深一些,出现在 30 cm 土层。随着干旱期的延长,在第 2 次采样(20130525)所得到的同位素特征变化如图 3 所示,坡下土壤各层的同位素特征几乎没有变化,而土壤坡面的整体变化趋势也没有改变,拐点出现的深度正慢慢下移至 30 cm,但是可以看出 10—20 cm 和 20—30 cm 土层的水分同位素特征差异不如上层明显;而坡中的土壤层同位素特征变化较为明显,特别是上层土壤(0—40 cm)同位素特征整体富集,土壤坡面的变化趋势没有变化,拐点出现的深度明显下移至 40 cm,在 40 cm 以下的土层水分同位素特征变化不大。

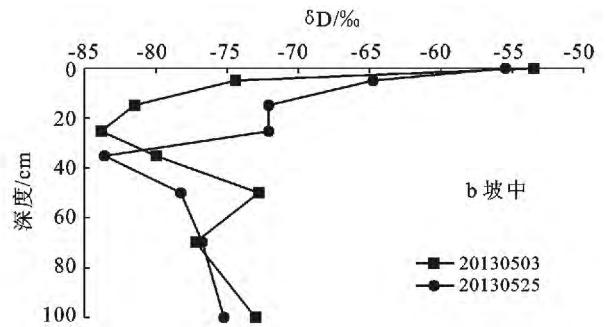
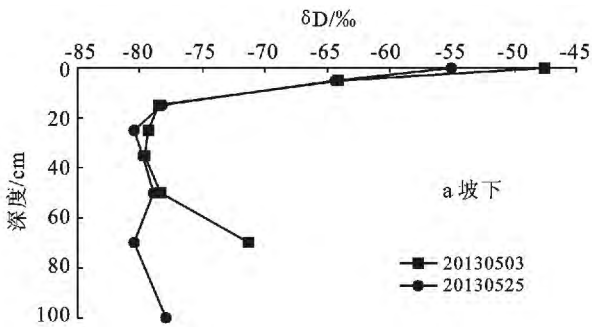


图 2 干旱期坡下和坡中枯落物层和土壤剖面水分同位素特征

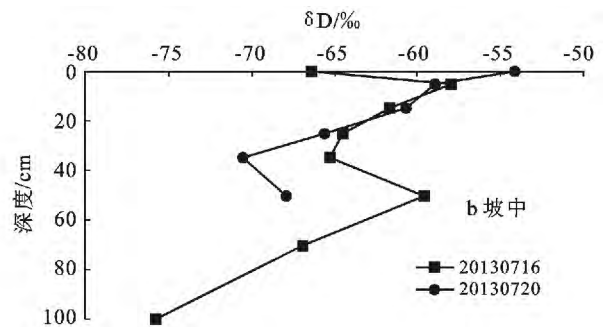
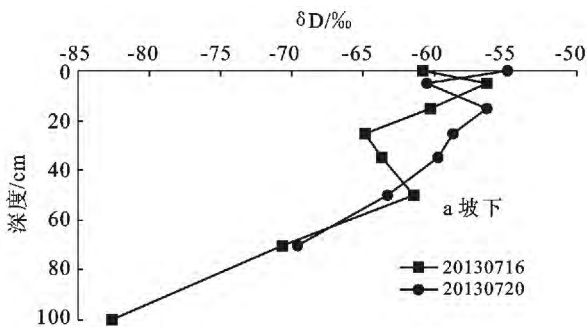


图 3 雨季坡下和坡中枯落物层和土壤剖面水分同位素特征

3.3 雨季极端降雨后坡面不同位置枯落物和土壤水分同位素特征

在雨季,根据采集的未分解层和分解层的枯落物样品水分同位素特征分析,发现他们之间有显著差

异,未分解层明显大于分解层,这种差异的原因不一定是由于表层枯落物层蒸发富集导致的,可能与降雨过程中同位素特征的变化有关,本研究采用未分解层(0 cm)的水分同位素特征代表枯落物层水分同位素

特征,观察水分的入渗过程。经过长历时的连续降雨后,无论坡中还是坡下,枯落物的同位素特征较表层(0—10 cm)土壤水分同位素特征小,而土壤剖面的同位素特征变化也具有相似性,在上层(<60 cm)土壤水分的同位素特征变化不大,都在-60‰左右,而在60 cm 以下的土层,水分同位素特征减小剧烈。这可能与土壤剖面的结构有关,60—80 cm 土层土壤的颜色变化明显,而且石砾含量较多。在经过 3 d 的无降雨期后,不同位置的表层枯落物水分的同位素特征由于蒸发而富集,而土壤剖面各层土壤水分的同位素特征变化有差异,坡中上层(0—30 cm)土壤水分同位素特征几乎没有变化,而坡下土壤上层(0—30 cm)的水分同位素特征变化明显,呈现自上而下出活塞流下渗的特征,后形成的土壤水能够取代先形成的土壤水并将其向下推移,即土壤 0—30 cm 土层水分的同位素特征保留了采样前 3 d(20130716)枯落物层以及 0—20 cm 的土壤水分稳定同位素组成特征(采样日期 20130720 土壤 0—10, 10—20, 20—30 cm 的同位素特征分别为-60.58‰, -56.27‰, -58.69‰分别与采样日期 20130716 枯落物层以及土壤 0—10, 10—20 cm 水分稳定同位素组成-60.78‰, -56.27‰, -60.21‰相对应)。同时仍然能够看到在坡下土壤同位素值剧烈

变化发生在 60 cm 土层以下,而在坡中土壤剖面在 60 cm 深度处遇到岩石而无法继续取样。

3.4 不同季节枯落物层水文效应对栓皮栎水分来源的影响

在旱季,根据枯落物和土壤各层水分氧同位素特征以及植物茎干水分的氧同位素值,通过直接对比法,能够初步得出栓皮栎的主要水分来源。在生长季刚开始时(展叶期,如图 4 所示),坡下和坡中栓皮栎茎干水分的同位素丰度值(-7.36‰, -7.88‰)比较接近,处在表层 0—20 cm 土壤同位素特征范围内,但与 0—10 cm 土层的水分同位素特征更为接近,表明此时水分主要来源在表层 0—10 cm,而随着干旱期的延长,在干旱期的第 2 次采样,土壤和植物的氧同位素特征如图 6 所示,相较于生长初期,坡下和坡中的栓皮栎茎干水分同位素特征都明显减小(-8.08‰, -10.41‰),而且不同位置差异明显,坡中的栓皮栎茎干水分小于坡下,主要水分来源也变深,在坡下栓皮栎主要来源与 10—20 cm 土层,而坡中处栓皮栎林的水分来源则更深,在 30—40 cm 深度甚至更深。这可能枯落物层的厚度有关,坡下枯落物层的厚度较坡中厚,随着枯落物层厚度的增加,抑制土壤蒸发的效应越大,从而减小了土壤蒸发损失。

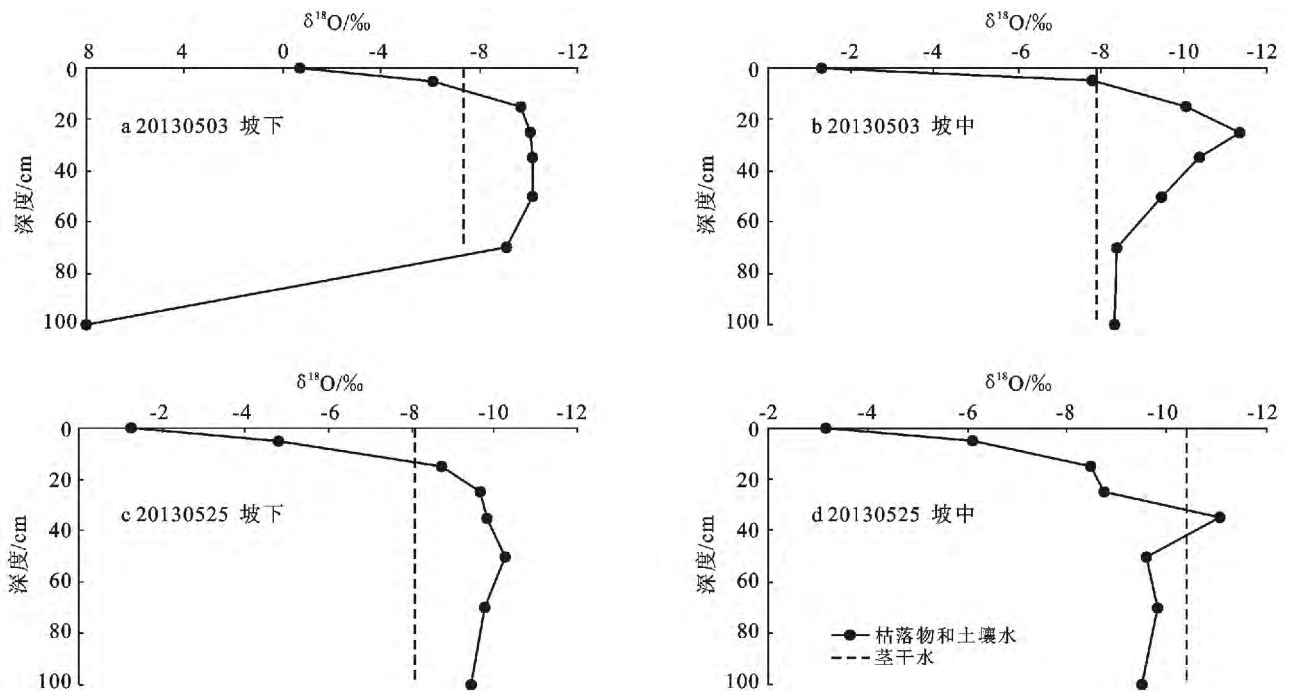


图 4 旱季不同时期坡中和坡下土壤与植物茎干水分同位素特征

在雨季,当利用稳定同位素判断出植物有多个水分来源时,通常假定较浅层的土壤为主要的来源,因为相对于深层土壤来说,通常表层土壤水分、养分充足,植物根系分布较多,同时吸收水分所消耗的

能量较少。如图 5 所示,坡下和坡中茎干水分同位素值接近(-6.95‰, -7.26‰),根据直接相关法,植物茎干水分同位素值处于枯落物层与表层 0—10 cm 土壤水分同位素特征之间,可以明显发现枯落物层水分

(特别是表层未分解层枯落物)对植物水分利用的贡献。而在经过几天晴天之后,植物茎水同位素值几乎没有变化,主要水分来源仍然来自表层枯落物和 0—10 cm 土壤,但是这时相对于未分解层,分解层对植物的水分来源贡献更为明显。

栓皮栎利用枯落物层水分不仅仅在试验数据的基础上,同时在野外试验中,枯落物层中生长的根系

也进一步证明了这个结果。这可能与生长季环境条件有关,在雨季连续降水,表层枯落物层不仅水分含量充足,而且此时温度和水分含量不仅对土壤微生物活性提高同时对枯落物层的分解也有利,从而促进了养分的释放,而此时也是根系生长的活跃期,根据根系生长的趋性,也有理由确定枯落物层水分对栓皮栎水分利用的贡献。

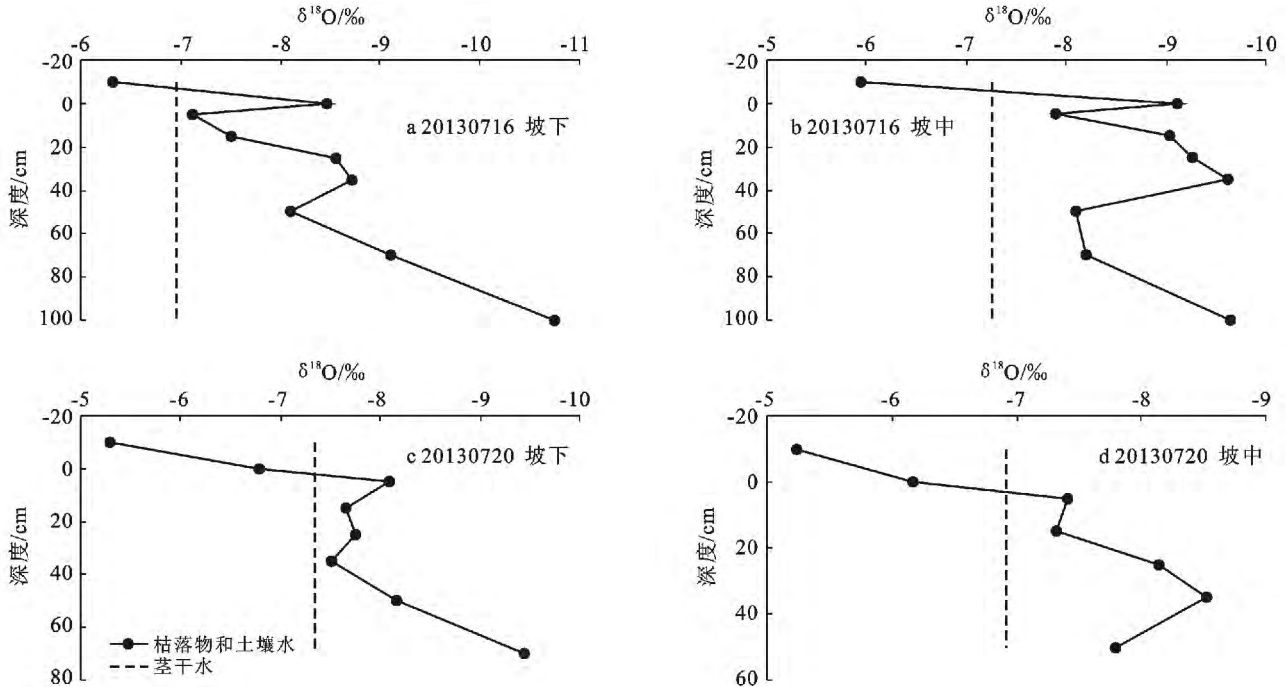


图 5 雨季不同时期坡中和坡下土壤与植物茎干水分同位素特征

4 结论与讨论

4.1 枯落物层对土壤水分同位素特征的影响

在坡面不同位置,以及坡面微地形的变化,枯落物层厚度不均一性,导致了不同位置土壤水分同位素特征的差异。在旱季,坡下与坡中土壤剖面水分同位素特征对比发现,在坡下出现拐点的深度较浅,同时随着干旱时间的延长,坡下土壤同位素特征的变化也较小,这可能与坡下枯落物层较厚有关。随着枯落物层厚度的增加,枯落物层抑制土壤蒸发的效应越大。这是由于土壤表面覆盖枯落物以后,阻碍了土壤表面蒸发水分与大气水汽的直接交换,加大了太阳光的折射、反射和吸收太阳能的增加,蒸发动力变小,土壤蒸发量减少;同时,随着枯落物厚度的增加,水分子在其中运移的距离增大,蒸发阻力变大,蒸发量随之减小。

在雨季,经过连续降雨和极端降雨事件后,雨水对整个剖面的完全渗润,不同位置枯落物层和土壤剖面同位素特征具有相同的变化,而在经过几天晴天后,不同位置土壤剖面同位素特征变化不同,主要差

异出现在分解层,坡中从未分解层向下,土壤同位素特征无变化,而在坡下,由于活塞流的出现,从未分解层开始,可以发现明显的水分驱替现象。这是由枯落物层的覆盖增加了地表粗糙度,增大了地表的曼宁粗糙系数,减缓径流的速度,增大了降雨径流与土壤的接触面,延长了降雨径流的入渗时间。增强了降雨量对地表径流和壤中流的影响。而枯落物层这种延长降雨入渗的效应显然也是随着其未分解层厚度的增加而增加的。

4.2 枯落物层对植物水分利用的影响

枯落物层对土壤水分特征的改变以及其本身的特性也间接改变了植物的水分利用,在旱季,生长季初期,坡中和坡下栓皮栎具有相同的水分来源,而随着干旱期的延长,水分利用的深度出现明显的差异,坡中位置的水分利用较深。这进一步说明了枯落物层厚度的差异对土壤水分蒸发的抑制作用的不同。而在雨季,枯落物层能够直接为栓皮栎提供水分,在前人的研究中很少有具体说明枯落物层对植物水分的贡献,这可能局部地区环境有关,因为相较于土壤

层,枯落物层的水分蒸发损失更快,水分变化剧烈,这对植物根系生长来说应该是很不利的,而在雨季由于长时间的连续降水和极端降水事件,不仅仅使得枯落物层达到最大持水量,还使得其能够长期保持大量的水分,而且此时温度和水分含量对土壤微生物活性提高和枯落物层的分解也有利,提供了大量的有机质,改良了土壤结构,增加了土壤孔隙,使土壤容重变小。生长季也是栓皮栎生长和根系更新的活跃期,这些也许是栓皮栎利用枯落物层水分的原因。

[参 考 文 献]

- [1] Bonkowski M, Scheu S, Schaefer M. Interactions of earthworms (*Octolasion lacteum*), millipedes (*Glomeris marginata*) and plants (*Hordelymus europaeus*) in a beechwood on a basalt hill: Implications for litter decomposition and soil formation[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998,9(1):161-166.
- [2] Borendse F. Implication of increased litter production for plant biodiversity[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1999,14(1):4-5.
- [3] Lee R. *Forest Hydrology*[M]. New York: Columbia University Press, 1980:1-6.
- [4] Yang Wenzhi, Wu Qinxiao. Forest and grassland vegetation construction and its sustainable development in Loss Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1998:65-66.
- [5] 刘少冲,段文标,赵雨森. 莲花湖区几种主要林型枯落物层的赤水性[J]. *中国水土保持科学*, 2005,3(2):81-86.
- [6] 张维诗,金靖博,唐亚森. 森林枯落物的水文功能[J]. *林业勘察设计*, 2007(3):35-36.
- [7] 周宏伟,李生宇,孙树国,等. 自然覆盖物对塔里木沙漠公路防护林土壤蒸发的影响[J]. *科学通报*, 2008,(53):123-130.
- [8] 申卫军,彭少麟,周国逸,等. 马占相思与湿地松人工林枯落物层的水文生态功能[J]. *生态学报*, 2001,21(5):846-850.
- [9] 王春红,吴勇,李秀博. 贡嘎山地区不同植被枯落物对降水影响的初步研究[J]. *西南农业学报*, 2009,22(6):1741-1744.
- [10] 李海军,张毓涛,张新平. 天山中部不同林龄天然云杉林地地表土壤入渗性能研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011,5(25):197-203.
- [11] 汪邦稳,杨洁,汤崇军. 南方红壤区百喜草及其枯落物对降雨径流分配的影响[J]. *水土保持学报*, 2009,2(23):7-11.
- [12] 张建利,张文,毕玉芬. 山地草地凋落物分解与凋落物水文功能[J]. *生态环境*, 2008,17(5):1986-1990.
- [13] 李嘉竹,刘贤赵. 氢氧稳定同位素在 SPAC 水分循环中的应用研究进展[J]. *中国沙漠*, 2008,28(4):787-794.
- [14] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. Characterisation of hydrogen isotope profiles in an agroforestry system: Implications for tracing water sources of trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2000,45(3):229-241.
- [15] 田立德,姚檀栋, Tsujimura M, 等. 青藏高原中部土壤水中稳定同位素变化[J]. *土壤学报*, 2002,39(3):289-295.
- [16] 程立平,刘文兆. 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[J]. *应用生态学报*, 2012,23(3):651-658.
- [17] 王仕琴,宋献方,肖国强,等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. *水科学进展*, 2009,20(4):495-501.
- [18] 关君蔚. 北京的水土保持[J]. *北京水利*, 1996(4):7-8.
- [19] 孙素艳,陈一鸣,姜健俊. 水土保持措施对山区水循环的影响:以宁夏南部山区为例[J]. *资源科学*, 2006,4(28):184-188.
- [20] Sturm P, Knohl A. Water vapor $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010,3(1):67-77.

(上接第 104 页)

- [7] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005,19(2):5-8.
- [8] 马璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D]. 陕西杨凌:西北农林大学, 2009.
- [9] 马波,吴发启,马璠. 种植大豆地表土壤溅蚀效应及其空间分布特征[J]. *土壤学报*, 2013,50(1):50-57.
- [10] 刘秉正,刘世海,郑随定. 作物植被的保土作用及作用系数[J]. *水土保持研究*, 1999,6(2):32-36.
- [11] Quinn N W, Lafflen J M. Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy[J]. *Transactions of the ASAE*. 1983,26(5):1445-1450.