

\*\*\*\*\*  
试验研究  
\*\*\*\*\*

# 基于环境同位素的红壤坡地水分运移研究

谢小立<sup>1,2</sup>, 尹春梅<sup>1,2</sup>, 陈洪松<sup>1</sup>, 孟薇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙 410125;

2. 桃源农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南桃源 415700)

**摘要:** 应用土壤学、水文学研究手段, 结合环境同位素示踪技术, 从形态学、能量学两个角度, 分析了红壤坡地油茶生态系统土壤水分的运移规律以及壤中流的发生机制。结果表明, 降雨入渗过程初期 0—40 cm 土层土壤水分受降雨入渗及蒸散发影响最大; 40—90 cm 为过渡层次, 水分呈上下交替运移。与浅根系荒草地相比, 深根系的油茶林更利于壤中流的发生, 同一土壤层次油茶林壤中流产流量较大, 但峰值流量较低, 产流过程开始早, 结束晚; 浅根系植被的荒草地降雨多以地表径流形式流失, 难以入渗蓄水; 同一植被状况, 产流量、峰值流量、滞后和拖尾均为上层(0—40 cm)小于下层(40—110 cm)。稳定性氢氧同位素测定结果表明, 壤中流的发生条件之一是存在相对的饱和层, 且产流主要来自驱替而出的原有土壤水分。

**关键词:** 红壤坡地; 土地利用方式; 水分运移(土壤水、壤中流); 环境同位素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0001-06

中图分类号: X142, S157

## A Study of Water Transportation on Red Soil Slope Based on Environmental Isotope Technologies

XIE Xiao-li<sup>1,2</sup>, YIN Chun-mei<sup>1,2</sup>, CHEN Hong-song<sup>1</sup>, MENG Wei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of

Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hu'nan 410125, China;

2. National Observation Station of Taoyuan Agro-ecology System, Taoyuan, Hu'nan 415700, China)

**Abstract:** The dynamic processes of soil water movement and interflow occurrence mechanisms for *Camellia oleifera* ecosystem on red soil sloping land were analyzed based on environmental isotope technologies, soil science and hydrological experiments in terms of morphology and energetics. Results showed that in the initial stage of rainfall infiltration, soil water in the upper layer(0—40 cm) was affected obviously by rainfall infiltration and evapotranspiration. The 40—90 cm layer was a transitional layer and soil water moved alternately upwards and downwards in rainfall infiltration process. Compared with wild grass ground, *Camellia oleifera* ecosystem with deep roots was easier for the occurrence of interflow. In the same soil layer, the amount of interflow in *Camellia oleifera* ecosystem was higher, whereas the peak value of interflow was lower and the progress of interflow occurrence lasted longer. Rainfall on the surface of wild grass ground with shallow roots was mostly lost as surface runoff, so it was difficult for infiltration and storage to occur. With the same vegetation coverage, interflow production, peak, lag and trailing in the upper layer(0—40 cm) were less than those in the lower layer(40—110 cm). The dynamic change of stable hydrogen and isotope of soil water indicated that a relatively saturated layer was one of basic conditions for the occurrence of interflow and the interflow was mainly from the displaced initial soil water.

**Keywords:** red soil sloping land; land use pattern; water transportation(soil water, interflow); environmental isotope

亚热带红壤丘陵区水、热资源较充足, 农业生产潜力巨大, 在农业可持续发展战略中占有重要的地

位<sup>[1]</sup>。油茶林在该区有着非常广阔的分布。据统计, 2008 年湖南省油茶林面积有  $1.69 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>。全省

收稿日期: 2011-07-26

修回日期: 2011-09-23

资助项目: 国家科技支撑计划“华中丘陵区油茶高产良种应用集成示范”(2009BADB1B0403)

作者简介: 谢小立(1958—), 男(汉族), 湖南省长沙市人, 研究员, 主要从事区域农业生态系统管理研究。E-mail: xlx@isa.ac.cn.

通信作者: 尹春梅(1982—), 女(汉族), 四川省什邡市人, 助理研究员, 主要从事区域生态系统物质循环研究。E-mail: cmyin@isa.ac.cn.

122 个县中有 120 个县种植油茶,其中有 3 个县为全国油茶产业发展示范县<sup>[2]</sup>。但是,由于该区农业生态系统脆弱,坡地开发利用因人地矛盾日益尖锐而处于无序状态,面临着水土流失,土地退化,季节性干旱和洪涝灾害等区域性重大科学问题<sup>[1]</sup>,严重制约了区域农业的可持续发展和生态环境的改善。已有许多学者对南方红壤坡地水分特征进行了研究<sup>[2-3]</sup>,然而这些研究多集中在土壤水分的时空动态变化方面,对于水分运移的机理研究还很匮乏。在坡地非饱和带中,由于土壤透水性随深度增加而逐渐减小,入渗雨水可能沿土层界面流动而形成壤中流。研究表明红壤坡地降雨产流过程中壤中流占有重要的组成成分<sup>[4]</sup>。然而,利用传统的水文学观测手段很难揭示水分运移机理和阐明壤中流的发生机制。

本研究结合新建的坡地水循环监测系统和同位素示踪技术,围绕生态和环境的核要素——水,研究红壤丘陵两种土地利用方式(油茶林及其砍伐后的自然恢复系统——荒草地)坡地土壤水分运移规律和不同类型植物耗水特征与水分来源,为该地区坡地油茶林生态系统的合理利用与开发,及其生态服务功能评价体系的建立提供科学依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

本研究的试验在中国科学院桃源农业生态试验

站进行。试验站设在湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村。地理坐标为 111°30'E, 28°55'N, 位于武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带。海拔高度 92~125 m, 属典型低丘红壤分布区。

该区受中亚热带季风湿润气候控制, 水热资源丰富。年平均气温 16.5 °C,  $\geq 10$  °C 年积温 5 200~5 300 °C, 年日照时数 1 520 h, 年降雨量 1 440 mm, 蒸发量 1 167 mm。多雨季节(3—6 月), 土壤水分盈余, 常伴有湿害、涝害, 而少雨时段(7—9 月)常伴随强烈的蒸散, 水分不能满足植被生长需求, 旱情突出。主要土壤类型为第四纪红土发育的红壤, 黏粒( $< 0.002$  mm)含量为 40% 左右, 有效水库容较低。2006 年全年降水量 1 225.8 mm, 略高于欠水年, 5—9 月降雨量 714.2 mm, 占全年降水总量的 58.26%, 该年降雨量分配较均匀。

### 1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 2006 年 2 月在试验站油茶林地建成 4 个试验小区, 其中左侧 2 小区为人工油茶林, 简称油茶林。根据试验站资料记载, 树龄约 50 a。右侧 2 小区将油茶林砍伐, 挖除土壤 0—40 cm 范围内的根系, 沿自然坡面整平, 自然恢复成为荒草地。小区投影面积均为 100 m<sup>2</sup> (20 m × 5 m), 坡度均一(17°)。每个小区的上方及两侧用 165 cm 高的隔水墙围隔(地上 15 cm, 地下 150 cm), 防止透水。试区土壤容重及土壤饱和导水率见表 1。

表 1 试区土壤容重及土壤饱和导水率

土层深度/cm		10	20	30	40	50	70	90	110
坡上	容重/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.194	1.350	1.419	1.442	1.447	1.467	1.613	1.546
	饱和导水率/(cm · min <sup>-1</sup> )	8.300	4.942	1.439	0.784	1.635	1.324	1.217	2.467
坡下	容重/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.118	1.285	1.336	1.370	1.396	1.428	1.558	1.551
	饱和导水率/(cm · min <sup>-1</sup> )	16.683	12.133	2.199	1.628	4.989	1.333	0.740	2.424

2006 年 4—9 月, 对该试验区  $> 20$  mm 以上的降雨进行了降水—产流—入渗再分布过程研究。共测定 6 次降水过程, 结果均呈现相似的规律。本文选取了 2006 年 6 月的一次典型过程进行数据分析与讨论。此次降雨始于 6 月 7 日 9 时, 结束于 6 月 8 日 14 时, 总历时 30 h, 降雨总量降雨量 100.8 mm, 平均雨强 3.4 mm/h。

#### 1.2.2 样品收集及测定

(1) 降雨用雨量计观测降雨量, 并收集雨水样。

(2) 壤中流按土壤基本理化性质, 把各小区壤中流分为 0—40 和 40—110 cm 两层进行观测, 用镀锌板集水槽集水, 集水面深入土层 30 cm; 用自计式翻斗流量计实时观测流量和流速, 斗容量 140 ml; 用

HOBO 计数器 (HOBO Event Logger, H8 or H7, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, U. S. A., 最小响应时间 0.5 s) 实时监测经流量和径流历时, 收集壤中流水样。

(3) 用镀锌板集水槽, 与地表平齐收集汇流地表径流, 并自制量水堰, 通过测定降雨过程量水堰水位, 计算径流量。

(4) 小区内埋设 DLS-II 负压计, 深度为 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110 cm 测定土壤水势; 典型降雨后逐日于当次降雨雨停时刻观测至下次降雨。

(5) 环境同位素<sup>[5]</sup> 氘和氧-18 的含量通常用  $\delta$  值表示, 该值为样品中氧-18 含量与国际标准水样 VSMOW (vienna standard mean ocean water) 氧-18

含量比值的千分差(permil 或 ‰):

$$\delta_D = \left[ \frac{(D/H)_{\text{sample}}}{(D/H)_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

$$\delta^{18}_O = \left[ \frac{(^{18}O/^{16}O)_{\text{sample}}}{(^{18}O/^{16}O)_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] \times 1000\text{‰} \quad (2)$$

式中:  $\delta_D$ ,  $\delta^{18}_O$ ——稳定同位素氘和氧-18 的含量。下同。

本文采用质谱仪 TC/EA 和 MAT253(Finnigan, USA)自动进行分析同位素含量,氢氧同位素误差( $2 \times \text{stdev}$ )分别为 1‰和 0.1‰。采用 SPSS 11.5 和 Excel 2007 软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同坡位土壤水分入渗特点

许多研究应用环境同位素得出了研究区的土壤水分降雨入渗过程<sup>[6-8]</sup>,但对于不同坡位土壤水分的研究不够深入。由图 1 可见,油茶地坡上浅层(0—40 cm)6月7日随着降雨过程的进行,降雨后比降雨中  $\delta_D$  值降低,随后温度的升高和蒸发的进行, $\delta_D$  值又逐渐升高;40—80 cm 处氢同位素的移动方向体现了

水分的逐渐入渗过程。 $\delta_D$  值的动态变化表明了随时间由上一层次逐渐向下层入渗,而其中 9 日与 12 日 40 cm 的富含稳定同位素氘的原因可能是由于坡上侧向壤中流的影响;深层 80—110 cm 与浅层 0—40 cm 呈现相同的变化规律。随着时间的延长, $\delta_D$  值同样逐渐增加,但其原因截然不同。该层次高的  $\delta_D$  值表明了它富含重同位素。但在该层次的上层土壤水中并未有如此富集重同位素的水分来源,由此可见,该层富含重同位素的水分是由下层的水分沿水势梯度向上迁移所致。油茶林坡下各层次水分  $\delta_D$  值随时间整体呈增大趋势,0—40 cm  $\delta_D$  值增大是因蒸发过程所致,40—80 cm  $\delta_D$  值随时间的延长逐渐增大,80—110 cm  $\delta_D$  值则随时间减小,40—110 cm  $\delta_D$  值的变化表明了土壤水分向上蒸发与向下入渗的运动过程。80—110 cm 层次土壤含水量高,水分饱和且水分以向下入渗为主,具备产生壤中流的条件。此外,在该点土壤中未出现富含同位素氘的土壤水分,且在雨后的 2~5 d 内  $\delta_D$  增大趋势明显增加,故其较高  $\delta_D$  的出现可能是来自坡上深层驱替而出的水分。

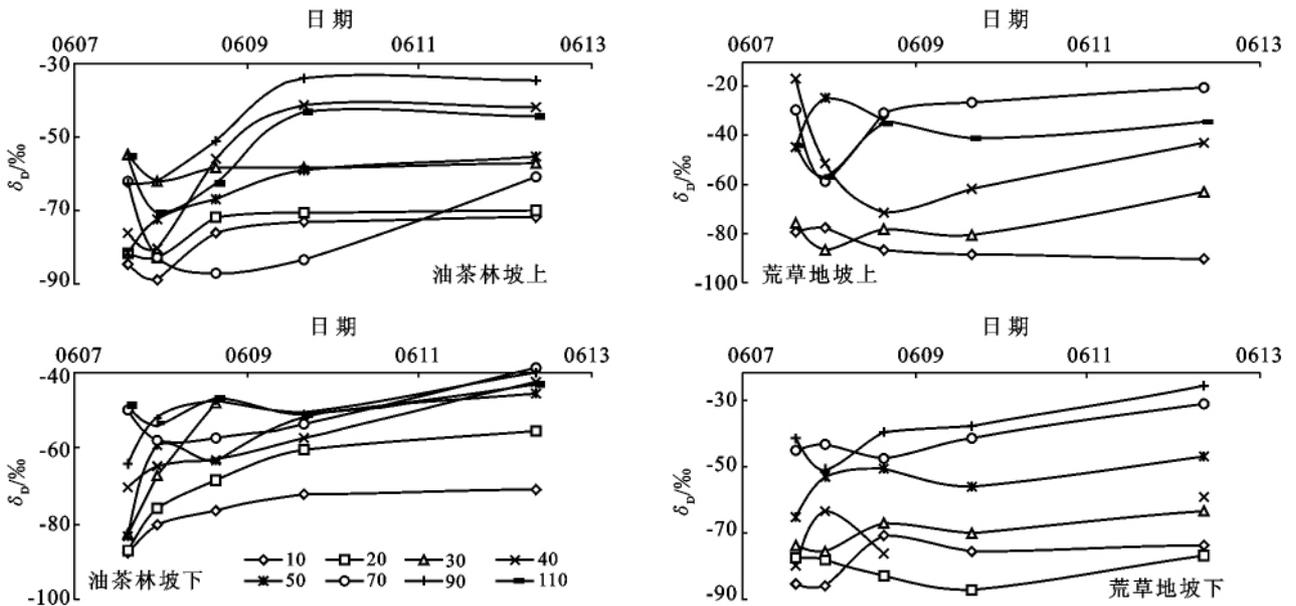


图 1 2006 年 6 月油茶林与荒草地土壤水分中  $\delta_D$  值时空变化

同样由图 1 可见,荒草地上 0—10 cm 土层雨后由于前期蒸发强烈,土壤水中富含重同位素,以至于 6 月 7 日雨后  $\delta_D$  值仍很高,8 日雨后才与降雨一致;40—70 cm 处氢同位素的移动方向体现了水分的入渗与蒸发过程;90—110 cm 是水分逐渐入渗的结果。12 日各层次同位素均出现了较明显的增大,表明上坡水分运移过程仍在进行,上方来水对下坡的水分运移仍产生明显的影响。

### 2.2 降水与植被类型对土壤水分运动的影响

由图 2 可见,降水与各层次土壤水分中  $\delta_D$  值随深度呈现规律性变化。随着深度增加,油茶林与荒草地土壤水分与降水中的  $\delta_D$  值的差异越来越明显,表明降水对深层土壤水分的影响逐渐减弱,其中 0—40 cm 土壤水受降雨的影响较大。

在该次降雨过程中,荒草地 0—40 cm 土层  $\delta_D$  值略低于油茶林(图 2),40 cm 以下深度二者差距逐渐增

加,至 110 cm 差距又减小。这表明在浅层 0—40 cm 土层二者主要受降雨因素的影响,降雨水分主要补给荒草地浅层土壤水分。而在 40—90 cm 土层,二者差距增大,油茶地同位素值与降水更接近。其原因除了

二者原有土壤水分同位素的状况之外,很重要的原因是由于油茶根系分布影响,水分运动活跃,受降水的影响大于草地。90—110 cm 深度受降水影响较弱,该层次以上降水补给的水分主要以壤中流形式排出。

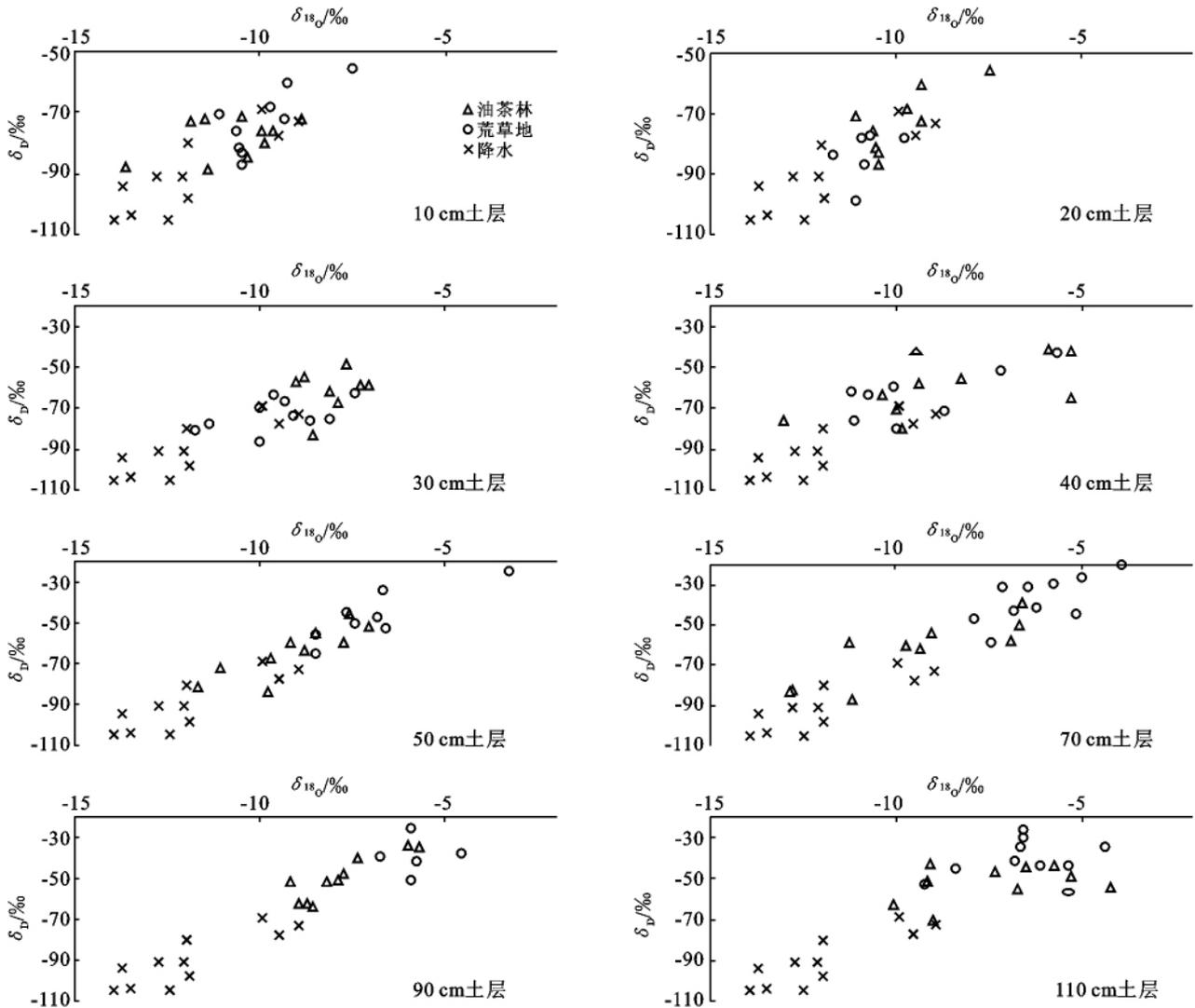


图 2 油茶林地不同深度土壤水分与降水中的  $\delta^{18}\text{O}$ — $\delta\text{D}$  相关分析

### 2.3 油茶林地表径流和壤中流同位素特征

油茶地表径流的  $\delta\text{D}$  值介于降雨与穿透雨之间(图 3),与其差异很小,更接近于穿透雨,且变化规律与降雨变化规律一致。地表径流主要为坡面饱和流,基本都源自降水;壤中流的产流主要来自驱替而出的原有土壤水分。雨季典型降水仅在浅层(0—40 cm)壤中流产流初期占 0.05% 左右,而深层(40—110 cm)壤中流几乎全部源自富含重同位素的土壤水分,且部分来自驱替而出的上方来水。

7 日 9:00—20:00 降雨历时 11 h,降雨量达 79.4 mm,最大雨强 28.8 mm/h,但并未产生壤中流,而 8 日 2:00—14:00 历时 13 h,降雨总量 21.4 mm,

最大雨强 5.8 mm/h,油茶林地却有壤中流。经过 6 月 7 日的强降雨,8 日 0—40 cm 壤中流对于降雨有较好的响应,最大流量为 0.982 ml/s(6 月 8 日 12:49),在最大峰值前有 2 次较小峰值,且均随雨强的增大而出现峰值,呈陡涨陡落型;40—110 cm 具有一定的滞后时间,在雨停后出现峰值,最大流量为 0.345 ml/s(6 月 8 日 16:27),呈缓涨缓落型,退水过程略长于涨水过程。

0—40 cm 土层壤中流  $\delta\text{D}$  值随着壤中流的出流过程呈现同样的规律性变化,产流初始  $\delta\text{D}$  值明显较小,接近表层 0—20 cm 土壤水分的  $\delta\text{D}$  值。在径流峰值时达到最大值,接着随退水过程又减小。40—110 cm 处

壤中流中  $\delta_D$  值与 0—40 cm 壤中流具有相反的规律,在涨水过程初期  $\delta_D$  值较高,随着涨水过程的进行  $\delta_D$  值逐

渐下降,在峰值又接近最大值,在退水过程中  $\delta_D$  值继续波动性增加,但其值整体高于降水,大于各层次土壤水。

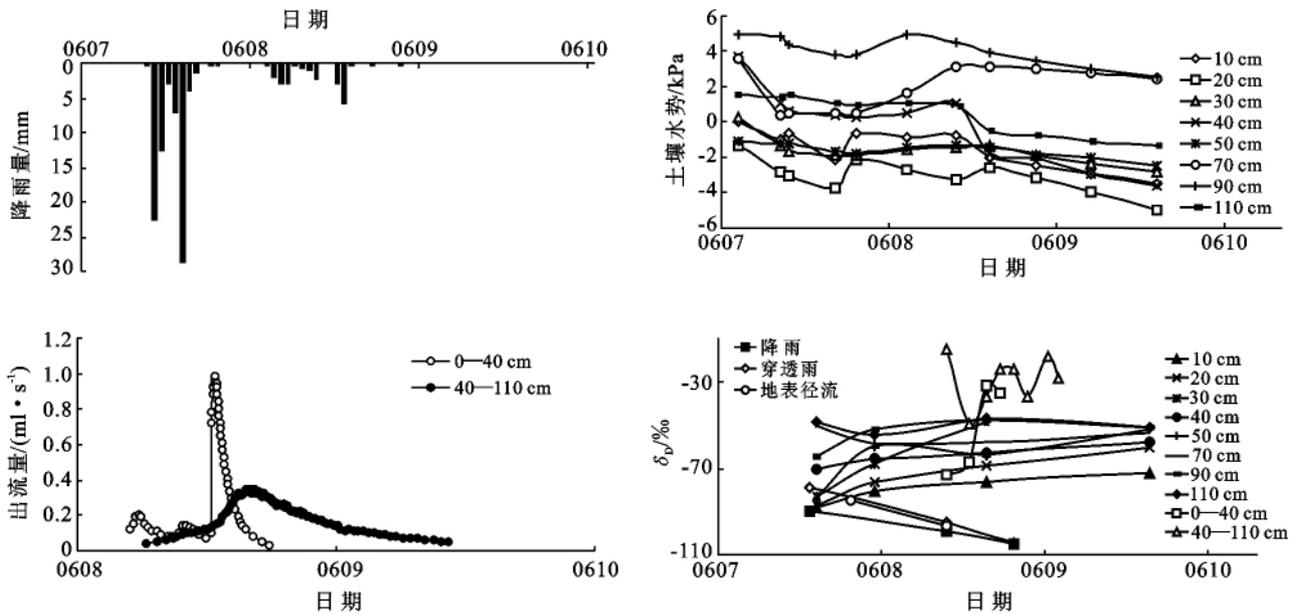


图3 2006年6月油茶林地不同降水、土壤水势、壤中流过程及  $\delta_D$  值动态变化

### 3 讨论

#### 3.1 降雨—入渗—土壤水分再分布规律

降雨后,地表径流产流量大于壤中流产流量。红壤坡地土壤水分含量均值随深度逐渐增加。土壤上层 0—40 cm 处水分动态变化快,水分运动活跃,长时期内水分变异系数较大,为活跃层与相对稳定层;深层 40—120 cm 处水分含水量高,变化相对稳定,长时期内水分变异系数较小,为相对稳定层。其形成原因有以下几方面:(1) 土壤质地。随着深度的增加土壤质地更密实,土壤容重增大,土壤孔隙度逐渐减少,水分运动的活跃性减弱。(2) 植被根系分布。植被根系多分布于 0—40 cm 层次,该层次土壤透水性强,而深层根系分布较少,浅根系植被更为明显。饱和导水率的数据反映出在土壤质地与植被根系的共同影响下,土壤饱和导水率在 0—40 cm 层次明显高于深层 40—120 cm 土层。此外深根系植被使深层土壤具有良好的通透性,增强了土壤的水分入渗性能。(3) 土壤水分运动过程。土壤水势与氢氧稳定同位素示踪结果表明,在降雨入渗—再分布过程中土壤上层 0—40 cm 处土壤水分多在降雨与蒸发条件下呈现单方向的上下运移,水分含量变化范围较大。而深层水分由于影响因素复杂,在水势梯度的作用下发生水分的上下交替运移。特别是在 40—90 cm 的过渡层次较为明显,水分运动相对于土壤上层复杂,深层水分接受上层与更深

层次的水分补给而得到一定的缓冲,水分含量较高,变异程度相对较小。

#### 3.2 红壤坡地壤中流产流机制

壤中流产流时土层含水量处于饱和状态,表明形成相对饱和层是壤中流发生的条件之一。0—40 cm 土层中壤中流在 40 cm 处土壤水分至不饱和状态后停止产流,而 40—110 cm 层次壤中流也在 110 cm 处水分至不饱和状态时达到峰值,此后逐渐至退水过程。因为此时 70—90 cm 层次土壤水分依然处于饱和状态,水分的入渗及再分布过程使壤中流持续至雨后约 20 h。

同位素动态监测结果表明,0—40 cm 土层中壤中流在产流初期主要来源于降雨与表层土壤水分的混溶,而在壤中流峰值前后,水分补给则主要来自上坡被驱替的更深层(90—110 cm 及以下)富含同位素氘的土壤水分,因而壤中流峰值附近  $\delta_D$  值也较高。40—90 cm 壤中流  $\delta_D$  总体较高,峰值出现前稍低。产流初期,壤中流主要来自驱替土壤中原有的深层土壤水分,随后由降水入渗补给该层土壤水分。下坡 40—90 cm 土层  $\delta_D$  值与上坡 90—110 cm 土层接近,表明了该层次壤中流水分的主要来源是上坡 90—110 cm 层被驱替而出的土壤水分。而壤中流的产流量、峰值流量、滞后和拖尾均为上层(0—40 cm)小于下层(40—110 cm)。运用同位素水文分割分析得出,降水(新水)所占的比例在 0—40 cm 处壤中流产流初

期仅仅占到 0.05%, 0—40 cm 土层壤中流产流中后期全部为原有的土壤水分(旧水)40—110 cm 土层壤中流同样来主要自于驱替的土壤水分(旧水)。由此可见, 壤中流产流的水分来源主要为原有的土壤水分, 且在径流过程中旧水的含量具有时程变化, 这与其他地区的研究结果相一致<sup>[9-10]</sup>。

壤中流是土壤水分运动的一种形式, 红壤坡地的侧向壤中流在坡地降雨产流过程中是一种重要的组成成分。通过分析结果可以看出, 由于土壤各层透水性能不同, 在一定条件下在低导水率层次上形成了相对饱和层, 而该低导水率层则成为相对滞水层, 该层次之上的饱和水分在沿坡面方向便形成了侧向壤中流, 壤中流的水分来源几乎全为原有的土壤水分(旧水)。深根系的油茶林利用水分的深层入渗, 可以在深层形成相对滞水层, 因而壤中流更易发生。同样也由于壤中流的存在, 使深层土壤水分含量不会过于饱和, 也是使深层土壤水分形成含水量较高的相对稳定层原因之一。

### 3.3 植被类型对壤中流发生的影响

油茶林地和恢复区地表径流产流系数分别为 1.5% 和 9.0%, 而壤中流产流系数分别为 1.2% 和 0.7%。地表径流受降雨历时和最大雨强影响最为明显, 其峰值对雨强的响应也非常明显。油茶林地壤中流产流量大于同层荒草地, 但壤中流峰值流量荒草地大于同层油茶林地。油茶林地表径流对壤中流的影响小于恢复区, 其中地表径流产流量对壤中流产流过程影响最为明显。在相近的初始含水量及降雨条件下, 油茶林地表径流产流量、峰值流量、产流历时及产流系数均小于恢复区, 但平均入渗率大于恢复区。在降雨量较小的情况下, 土地利用方式对地表径流过程影响最大。在降雨量较大且有地表产流时, 影响地表径流产流量及产流系数、产流历时、峰值流量的主要因素是最大雨强, 其次是降雨量; 而影响平均入渗率的主要因素是降雨历时, 其次是降雨量。与浅根系的荒草相比, 深根系的油茶能促进红壤坡地壤中流的发生, 延长降水在土壤中的再分配过程, 提高降水在生态系统中的利用率, 减少地表径流的发生, 同时也降低水土流失的风险。

## 4 结论

本研究从能量(土壤水势)的观点, 结合土壤水分的稳定性氢氧同位素时空动态变化, 揭示了油茶林地及其自然恢复区土壤剖面不同层次土壤水分的运移规律。结果表明, 0—40 cm 土层中土壤水分受降雨入渗及蒸散发影响最大; 40—90 cm 为过渡层次, 水

分呈上下交替运移; 降雨入渗过程初期 90—110 cm 土壤水分可依土壤水势梯度向上迁移, 再分布 2 d 后才呈现向下运移的趋势。水分的交替运移是 40—110 cm 土层土壤水分形成相对稳定层的原因之一。土壤水势的动态变化表明, 红壤坡地壤中流的发生条件之一是存在相对的隔水层和相对的饱和层。由于壤中流的主要影响因素是土壤物理特性、分层状况和水流补给条件, 土壤中的非毛管孔隙、动植物洞穴可促成壤中流的发展, 因此深根系植被的油茶林更利于壤中流的发生。但雨季典型降水仅在浅层(0—40 cm)壤中流产流初期占很小比例, 大部分降雨用于补给土壤水分, 地表径流主要为坡面饱和流, 而深层(40—110 cm)壤中流几乎全部源自土壤水分, 且部分来自驱替而出的上方来水。而浅根系植被下降雨多以地表径流形式流失, 难以入渗蓄水。

### [参 考 文 献]

- [1] 中国农业科学院. 红黄壤地区综合治理与农业持续发展研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 1-24.
- [2] 方堃, 陈效民, 杜臻杰, 等. 低山丘陵区红壤水分的动态变化及影响因素[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 67-72.
- [3] 罗勇, 陈家宙, 林丽蓉, 等. 基于土地利用和微地形的红壤丘岗区土壤水分时空变异性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 36-41.
- [4] 王峰, 沈阿林, 陈洪松, 等. 红壤丘陵区坡地降雨壤中流产流过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 15-17, 29.
- [5] 顾慰祖, 陆家驹, 陈廷扬, 等. 中国陆地水元素组成的中子活化分析试验[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 535-541.
- [6] Li Sheng-Gong, Hugo Romero-Saltos, Maki Tsujimura, et al. Plant water sources in the cold semiarid ecosystem of the upper Kherlen River catchment in Mongolia: A stable isotope approach [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(1): 109-117.
- [7] Maki Tsujimura, Asusi Numaguti, Tian Lide, et al. Behavior of subsurface water revealed by stable isotope and tensiometric observation in the Tibetan Plateau [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2001, 79(1b): 599-605.
- [8] Maki Tsujimura, Yutaka Abe, Tadashi Tanaka, et al. Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River basin, a semi-arid region in eastern Mongolia [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(1): 47-57.
- [9] 顾慰祖. 利用环境同位素及水文实验研究集水区产流方式[J]. 水利学报, 1995(5): 9-17, 24.
- [10] 徐庆, 安树青, 刘世荣, 等. 四川卧龙亚高山暗针叶林降水分配过程的氢稳定同位素特征[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 7-12.