

湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定性同位素特征

田日昌^{1,2}, 陈洪松^{1*}, 宋献方³, 王克林¹, 杨青青¹, 孟薇¹

(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, 长沙 410125; 2. 中山市环境保护科学研究所, 中山 528403; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 稳定同位素技术为土壤水运移研究提供了新的研究手段. 通过对红壤丘陵区降水和不同深度土壤水稳定性氢氧同位素的示踪, 研究了2种不同植被类型(油茶林、玉米地)土壤水分运移过程. 结果表明, 该区大气降水稳定性同位素存在明显的降水量效应和季节效应. 油茶林0~50 cm、玉米0~40 cm土壤水氢氧同位素值随深度增大而增大, 但干旱时段降水后表现出相反的趋势; 油茶林50 cm、玉米40 cm以下土壤水氢氧同位素值随深度增大而减少, 蒸发影响微弱. 油茶林入渗率受降水量影响明显, 大雨后2~3 d入渗率约为50~100 mm/d, 之后入渗率明显减慢, 50 cm土层常成为阻隔层. 玉米地由于通透性差, 入渗率更低. 红壤丘陵区土壤水氢氧同位素值变化主要是受前期降水形成的混合水样的影响, 蒸发影响次之. 油茶林蒸发强度小于玉米地, 但蒸发深度较玉米地深.

关键词: 红壤丘陵区; 土壤水; 蒸发; 入渗; 稳定性同位素

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2747-08

Characteristics of Soil Water Movement Using Stable Isotopes in Red Soil Hilly Region of Northwest Hunan

TIAN Ri-chang^{1, 2}, CHEN Hong-song¹, SONG Xian-fang³, WANG Ke-lin¹, YANG Qing-qing¹, MENG Wei¹

(1. Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, 410125, China; 2. Zhongshan Research Institute of Environmental Protection, Zhongshan 528403, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Stable isotope techniques provide a new approach to study soil water movement. The process of water movement in soils under two kinds of plant types (oil tea and corn) were studied based on the observed values of hydrogen and oxygen isotopes of precipitation and soil water at different depths in red-soil sloping land. The results showed that stable isotopes of precipitation in this area had obvious seasonal effect and rainfall effect. The stable isotopes at 0-50 cm depth in oil tea forestland and at 0-40 cm depth in corn cropland increased with the increase in depth, respectively, but they had the opposite tendency after rainfall in arid time. The stable isotopes decreased with the increase in depth below 50 cm depth in oil tea forestland and below 40 cm depth in corn cropland where evaporation influence was weak. The infiltrate rate of soil in oil tea land was affected by precipitation obviously, and it was about 50-100 mm/d after 2-3 days in heavy rain, slowed sharply later, and soil water at 50 cm depth often became a barrier layer. The permeability of soil in corn land was poor and the infiltration rate was lower. The change of stable isotopes in soil water in red soil hilly region was mainly affected by the mixing water which was formed by the antecedent precipitation, and evaporation effect took the second place. The evaporation intensity in oil tea land was lower than that in corn land, but the evaporation depth was higher.

Key words: sloping land in red soil region; soil water; evaporation; infiltration; stable isotope

土壤水是水循环过程重要环节之一. 土壤水运移研究对于水分的再分配机制、养分及污染物在非饱和土壤中的迁移过程等都具有重要的意义^[1], 其影响因素包括气候特征、土壤质地、土壤结构等^[2]. 国内对黄土高原土壤水分运移研究开展的比较多^[3,4], 对红壤也有一些研究, 但主要集中在土壤水季节性干旱以及土壤水分对作物的有效性等方面^[5,6], 土壤水分运移机制仍旧不明确.

稳定氢氧同位素技术为水文循环研究提供了新的手段, 已被广泛应用于非饱和水分运移^[1,2,7~14], 它可以精确揭示水文过程, 包括入渗、产流、蒸散发

等^[1,13]. 例如运用氢氧同位素对高原刺槐林和松树林土壤剖面土壤蒸发、入渗的比较^[11], 对牧草地、荒草地、森林地土壤水垂向运移机制的探讨^[12], 对太行山低山丘陵区刺槐林地和荒草地土壤水分入渗和补给量特征的研究^[13]. 尽管土壤水的稳定性同位素

收稿日期: 2008-11-30; 修订日期: 2009-02-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-441); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(01200220055413); 中国科学院院长奖获得者科研启动专项资金项目

作者简介: 田日昌(1981~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文, E-mail: tianrichang1981@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hbcshs@isa.ac.cn

示踪多在干旱和半干旱地区开展,但是在湿润区、半湿润区也有一些尝试. Hsieh 等^[14]在夏威夷岛沿横断面从干旱区到湿润区取土分析土壤水氢氧同位素,指出蒸发对蒸腾的比例随着降水的增多以及温度的降低而减少. Lee 等^[15]通过测定济州岛降水和不同深度土壤水的稳定性同位素,指出该区全年蒸腾都大于蒸发,并估计了土壤水再分布过程、滞留时间等. 在我国,许多研究者^[16,17]对不同地区不同深度土壤水稳定同位素的变化规律及其水分运移的关系也进行了报道,但红壤丘陵区土壤水分运移机制尚不明确. 红壤丘陵区位于中国南方湿润半湿润地区,降水比较充沛,但由于水资源时空分配不均,季节性干旱问题突出,加上长期不合理的开垦利用,洪涝、渍害及水土流失严重,故开展土壤水分运移研究对于该区合理利用水资源、优化水分管理模式有重要意义. 本研究基于稳定同位素示踪技术,通过分析油茶林和玉米地降水以及各层土壤水的稳定氢氧同位素值,揭示土壤水的运移特征.

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院桃源农业生态试验站定位观测试验场,地处湖南省桃源县漳江镇宝洞峪村(111°30'E, 28°55'N),为武陵山区向洞庭湖平原过渡的丘岗地带,海拔 89.0 ~ 121.8 m,属典型低丘红壤分布区. 该区年平均气温 16.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温 5 171.5℃, 极端最高气温 40.6℃, 极端最低气温 -15.8℃, 年均蒸发量 1 190 mm, 年平均降雨量 1 440 mm, 主要分布于 4 ~ 8 月, 平均相对湿度 82%, 年日照时数 1 531.4 h, 为典型亚热带季风气候. 土壤类型为第四纪红土发育的红壤. 地带性植被为中亚热带常绿阔叶林, 属于武陵山植物区系.

1.2 试验小区概况

自 2005 年 11 月 ~ 2006 年 2 月在油茶林坡地修建 4 个试验小区, 其中 2 小区去除油茶林(含地上地下部分)后于 2006 年撂荒, 2007 年 3 月底种植玉米, 玉米株距 25 cm、行距 70 cm, 并且于 4 月中旬对玉米地进行稻草覆盖, 8 月初玉米收割. 小区投影面积均为 100 m² (20 m × 5 m), 坡度均一(17°), 坡向为东偏南. 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), 其中隔水墙上部 50 cm 为钢筋混凝土板, 下部 120 cm 为塑料板, 交接处重叠 5 cm 并用混凝土浇筑, 防止透水. 油茶林树龄约 50 a, 种植密度为 3 000 株/hm², 平均树高 3.2 m, 平均

胸径 15 ~ 17 cm, 油茶林郁闭度 70% ~ 80%, 林下草本层高 20 ~ 40 cm, 盖度 80% ~ 90%, 主要有树莓(raspberry)、大叶胡枝子(*Lepedeza davidii* Franch)等. 小区表层 0 ~ 20 cm 土壤粘粒(< 0.002 mm)占 35.05%, 粉粒(0.02 ~ 0.002 mm)占 41.86%, 按照国际制土壤质地分类标准, 属粉砂质粘壤土.

1.3 样品采集和测定方法

相邻的油茶林和玉米小区用于稳定同位素试验. 降水水样采用自制的采集装置采集: 塑料瓶瓶口和漏斗用橡胶塞紧密连接, 漏斗口上面放置一乒乓球, 防止水分蒸发. 装置布设在小区内, 每一次降水过程, 降水中及降水后立即取样. 降雨量由放置在小区附近的美国产翻斗式雨量计及 HOBO 数据采集器自动记录.

土壤水样是由中国科学院地理科学与资源研究所设计的土壤水样采集器采集. 在相邻的油茶林、玉米小区, 距坡上、下边界 5 m 处处理设陶土头, 深度分别为 10、20、30、40、50、70、90 和 110 cm, 仪器通过负压将陶土头周围的水吸入收集瓶中, 获得相应深度的土壤水. 降水后连续 2 ~ 5 d 取样, 取样后马上于 -4℃ 下保存. 所有水样氢氧同位素分析在中国科学院地理科学与资源研究所同位素实验室 Finnigan MAT-253 质谱分析仪用 TC/EA 法测定, 仪器精度为 $\delta^{18}\text{O}_{\text{STDEV}} \leq 0.3\text{‰}$, $\delta\text{D}_{\text{STDEV}} \leq 2\text{‰}$, 测量出的稳定性氢、氧同位素值以 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表示, 分析结果均以 V-SMOW 为标准, 表示为: δD (或 $\delta^{18}\text{O}$) = $[(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}})/R_{\text{标准}}] \times 1000(\text{‰})$. 式中 $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标准}}$ 表示样品和标准物中稳定性氢同位素(D/H)或稳定性氧同位素¹⁸O/¹⁶O 的比例.

2 结果与讨论

2.1 降水稳定同位素变化

根据 2006 年及 2007 年 5 ~ 9 月降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 建立本地区大气降水线(local meteoric water line, LMWL), 如图 1 中所示, 其方程为: $\delta\text{D} = 7.432 \delta^{18}\text{O} + 0.605$, $R^2 = 0.953$, $n = 36$. 其斜率和截距与全球大气降水线 $\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ ^[18] 相比较都较低, 同时也与附近长沙大气降水线 $\delta\text{D} = 8.47 \delta^{18}\text{O} + 15.46$ ^[19] 不同. 表明了 2a 的降水量都偏少, 且降水在水汽运移及雨滴降落的过程中经历了一定的蒸发. 比较 2007 年 5 ~ 9 月大气降水的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 实测值, 可以看出, 降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度较大. 其中, $\delta^{18}\text{O}$ 介于 -14.12‰ ~ -3.93‰ 之间, δD 介于 -103.40‰ ~ -27.58‰ 之间. 而且 2007 年不同月份

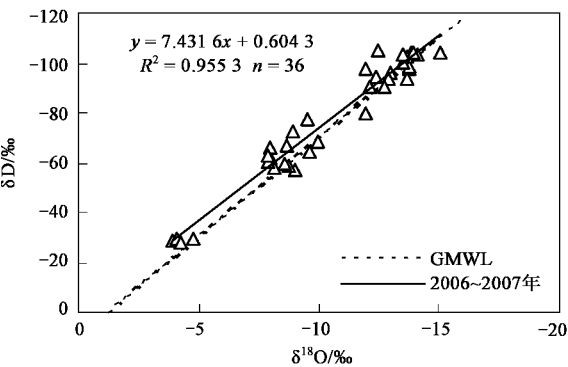


图1 2006~2007年桃源站降水 δD-δ¹⁸O 关系
Fig.1 Relationship between δD and δ¹⁸O of precipitation at Taoyuan station during 2006-2007

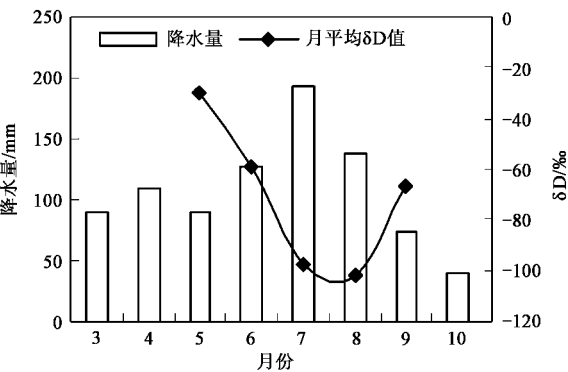


图2 2007年桃源站降水量与各月 δD 平均值关系
Fig.2 Relationship between monthly rainfall and δD at Taoyuan Station in 2007

大气降水的 δD 值表现出明显的降水量效应、季节效应(见图2)。5月氢同位素组分富集,δD 值明显较高,平均为-28.77‰,表明该月降水量明显较常年

偏少,大气较干燥且蒸发强烈,也有可能是由于水汽来源本身 δD 值偏高;7、8月由于降水频繁,δD 值贫化,均值分别为-97.04‰、-100.78‰;6、9月 δD 值居中,均值分别为-58.42‰、-65.69‰。

2.2 土壤水稳定同位素变化
2.2.1 不同深度土壤水氢氧同位素分布特征

表1为降水和不同深度土壤水氢氧同位素统计特征,其中各层土壤水 δ¹⁸O、δD 均值都大于降水 δ¹⁸O、δD 均值,表明降水在土壤入渗的过程中受其他因素的影响,如蒸发等。而对比2种不同植物土壤水的同位素均值指出,油茶林土壤水同位素均值明显小于玉米,表明油茶林的通透性强于玉米,同时也与植被覆盖度以及根系分布情况等有关系^[12]。油茶林表层10~40 cm 土壤水 δ¹⁸O、δD 均值逐渐递增,40~110 cm 递减后略有增加。而玉米地表层10 cm 土壤水 δ¹⁸O、δD 均值轻于20 cm,20~110 cm 均值增加,50 cm 有小的波动。对括弧内标准差分析发现,油茶林 δ¹⁸O、δD 的标准差随深度渐小,这与 Hsieh 等^[14]在夏威夷岛、Li 等^[13]在太行山区研究的土壤水变化趋势一致,主要原因是表层重同位素的积累以及土壤水活塞模型的影响,即最近降雨的水分迫使原来的土壤水向下流动^[9,13]。但是玉米又有所不同,10~20 cm 标准差递增,20~110 cm 逐渐减少,在70 cm 处有所增大,同时笔者注意到玉米地90~110 cm 标准差非常小,与其他层次显著不同,这与 Li 等^[13]和 Bengtsson 等^[20]、Heish 等^[14]研究结果是一致的,即深层土壤水同位素值变化微小。玉米20 cm 标准差>10 cm 原因可能与稻草覆盖有关,使得20 cm 易于聚水。

表1 红壤丘陵区降水及不同深度土壤水同位素值统计特征¹⁾

Table 1 Statistic characteristics of isotopic composition in precipitation, different depths of soil water at slope of red soil							
类型	深度/cm	油茶林		玉米			
		样本数	δ ¹⁸ O均值/‰	δD 均值/‰	样本数	δ ¹⁸ O均值/‰	δD 均值/‰
降水		20	-10.21(3.73)	-73.65(28.85)	12	-8.65(3.81)	-61.41(29.29)
	10	11	-8.20(3.50)	-57.50(29.47)	10	-4.66(2.62)	-32.29(20.95)
	20	14	-7.79(3.31)	-53.78(26.86)	9	-6.44(3.94)	-43.08(33.70)
	40	15	-5.80(2.26)	-37.28(18.76)	10	-5.97(2.80)	-37.60(26.17)
土壤水	50	15	-6.05(2.13)	-38.54(20.00)	6	-2.80(0.93)	-12.83(9.01)
	70	15	-6.74(2.11)	-45.54(17.78)	10	-4.04(1.24)	-19.86(13.53)
	90	15	-5.96(1.90)	-38.82(14.20)	6	-3.85(0.47)	-18.40(1.90)
	110	11	-6.29(1.64)	-39.34(13.43)	6	-3.91(0.34)	-20.09(2.00)

1) 括弧内数据为标准差,由于部分时间难于取到样,油茶林采用最低的11个样统计,玉米采取最低的6个样统计

图3是各场降水不同深度土壤水 δD-δ¹⁸O 关系,油茶林和玉米土壤水的环境同位素值都主要分布在当地大气降水线上及左上方,偏向正值区。这与 Lee 等^[15]研究的济州岛夏季降水线及土壤水分布趋

势相似,指出湿润半湿润地区土壤水受降水影响显著。同时玉米比油茶林更加聚集在降水线左上方,表明玉米土壤水的蒸发分馏作用要比油茶林强烈。2种植物10、20 cm 土壤水 δD 和 δ¹⁸O 值分布于当地大

气降水线的两侧,且比较分散,受降水影响明显.40~70 cm δD 和 $\delta^{18}O$ 同样分布比较分散,但是玉米部分值已经明显偏离当地大气降水线,表明受到前期降水混合样或是蒸发的影响.70~110 cm δD 和 $\delta^{18}O$ 则是越来越偏离当地大气降水线,而且同位素值越

来越集中,这在玉米地表现更加明显,其值随深度变化越来越小,表明玉米地深层受蒸发影响非常微弱.

对不同深度土壤水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值进行均差比较分析(如表 2).结果显示 10、20 cm $\delta^{18}O$ 值,40、70、90、110 cm 相互之间 δD 和 $\delta^{18}O$ 值无显著性差异($p > 0.05$),而其他各层土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值都存在显著性差异($p < 0.05$).

运用多因素方差分析比较了不同处理、不同土层、不同季节 2007 年 5~9 月所有土壤水分同位素值(表 3).土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值在不同处理间以及不同季节、不同层次总体都存在显著性差异($p < 0.01$).而且处理与土层交互作用、季节与土层交互作用、处理土层季节三者交互作用对结果也达到显著影响($p < 0.01$),处理与季节交互作用 δD 值对结果影响不显著($p > 0.05$).比较偏差平方和可知:季节效应 > 土层与处理交互效应 > 处理效应 > 土层与季节交互效应 > 土层效应 > 处理土层季节三者交互作用 > 处理与季节交互效应.这也印证了前文所提到的降水同位素季节效应非常显著,且红壤区土壤水受降水影响比较大.

2.2.2 土壤水蒸发

蒸发使得重同位素在土壤表层明显富集^[14, 21~23].但是富集过程并非单由蒸发引起,是由众多过程综合而成,如蒸发的强度、降水量大小的影响、旧水和新水的混合等^[11, 14, 18].本研究区 6~9 月油茶林表层 0~40 cm 土壤水同位素值表现出以上 3 种形式的混合.例如 7 月 25 日降水量为 69.4 mm,当天降水样、土壤水样都是在雨中取,所以蒸发影响非常小,经测降水 δD 均值为 $-97.04‰$,离表层 10、20、40 cm δD 值分别为 $-83.74‰$ 、 $-71.75‰$ 和 $-59.12‰$.土壤水稳定同位素大于降水主要是受前期降水形成的混合水样的影响.油茶林 0~40 cm 土壤水稳定同位素表现出随深度增加而增大,这是由于降水入渗推动混合水向下移动引起的^[11, 14, 18][见图 4(c)和表 1],这与 Brunel 等^[24]在尼日尔研究的土壤水稳定氢同位素垂直分布规律一致,但众多研究者^[9, 11, 13, 24, 25]在干旱和半干旱区的研究指出,30 cm 以上由于蒸发的影响,稳定同位素随深度增加是减少的,这种情况在红壤区持续干旱时段的降水过程中也有体现,如研究区当年 5 月前期降水稀少,天气较干燥,5 月 24 日降水量为 31.2 mm,降水样为降水中所取,土壤水是降水后立即取,降水 δD 均值为 $-28.77‰$,表层 10、20 和 40 cm δD 值分别为 $-17.90‰$ 、 $-21.40‰$ 和 $-22.21‰$,表明当时蒸发

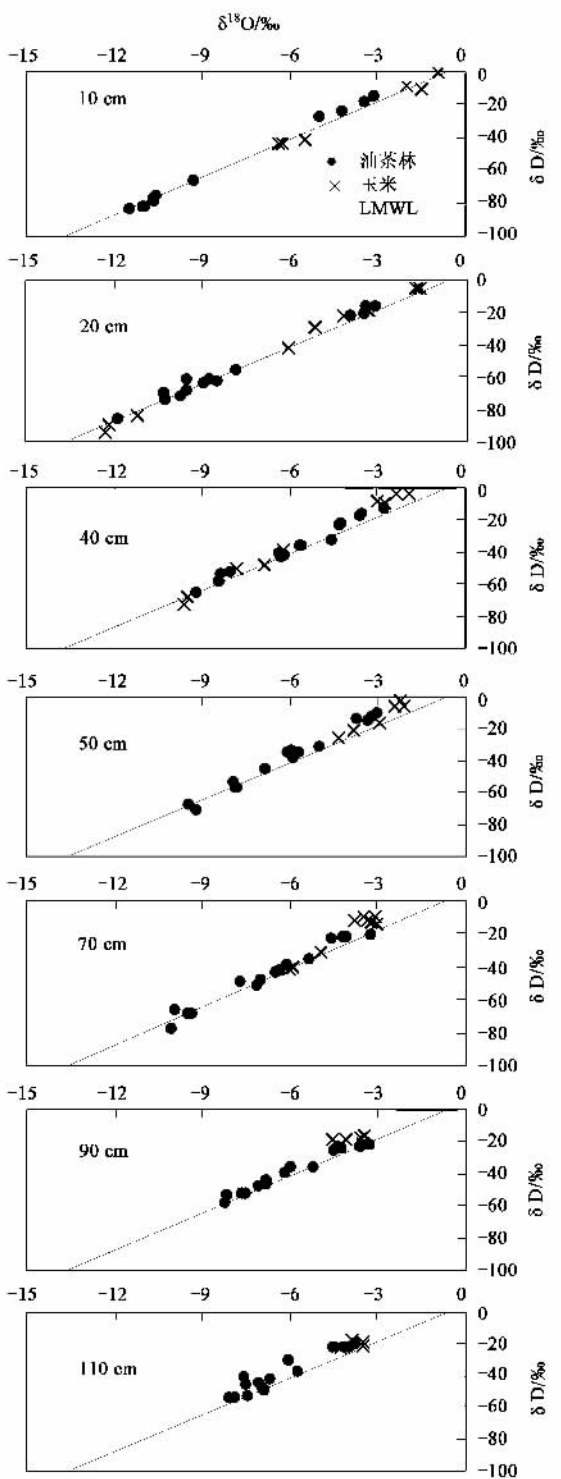


图 3 不同深度土壤 δD - $\delta^{18}O$ 的关系

Fig.3 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ values of soil water at different depths

表 2 土壤水各层同位素值均差比较¹⁾

Table 2 Mean variance comparison of isotope values of soil water in different soil layers								
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	70 cm	90 cm	110 cm
10 cm	—	0.747 ^{* *} (4.103)	− 3.8737 ^{* *} (− 31.901 ^{* *})	− 0.645 ^{* *} (− 8.086 ^{* *})	− 1.337 ^{* *} (− 14.295 ^{* *})	− 0.853 ^{* *} (− 10.220 ^{* *})	− 1.082 ^{* *} (− 11.772 ^{* *})	− 0.905 ^{* *} (− 11.480 ^{* *})
20 cm		—	− 4.621 ^{* *} (− 36.004 ^{* *})	− 1.392 ^{* *} (− 12.189 ^{* *})	− 2.0854 ^{* *} (− 18.398 ^{* *})	− 1.600 ^{* *} (− 14.322 ^{* *})	− 1.829 ^{* *} (− 15.875 ^{* *})	− 1.651 ^{* *} (− 15.582 ^{* *})
30 cm			—	3.229 ^{* *} (23.815 ^{* *})	2.535 ^{* *} (17.606 ^{* *})	3.021 ^{* *} (21.682 ^{* *})	2.792 ^{* *} (20.129 ^{* *})	2.970 ^{* *} (20.422 ^{* *})
40 cm				—	− 0.694 [*] (− 6.209 ^{* *})	− 0.208 (− 2.133)	− 0.437 (− 3.686)	− 0.260 (− 3.393)
50 cm					—	0.486 (4.076)	0.257 (2.523)	0.434 (2.816)
70 cm						—	− 0.229 (− 1.553)	− 0.052 (− 1.260)
90 cm							—	0.177 (0.293)
110 cm								—

1) * 表示 $p < 0.05$ 显著性差异, ** 表示 $p < 0.01$ 极显著性差异,括弧内为 δD 分析结果

表 3 土壤水同位素值多因素方差分析

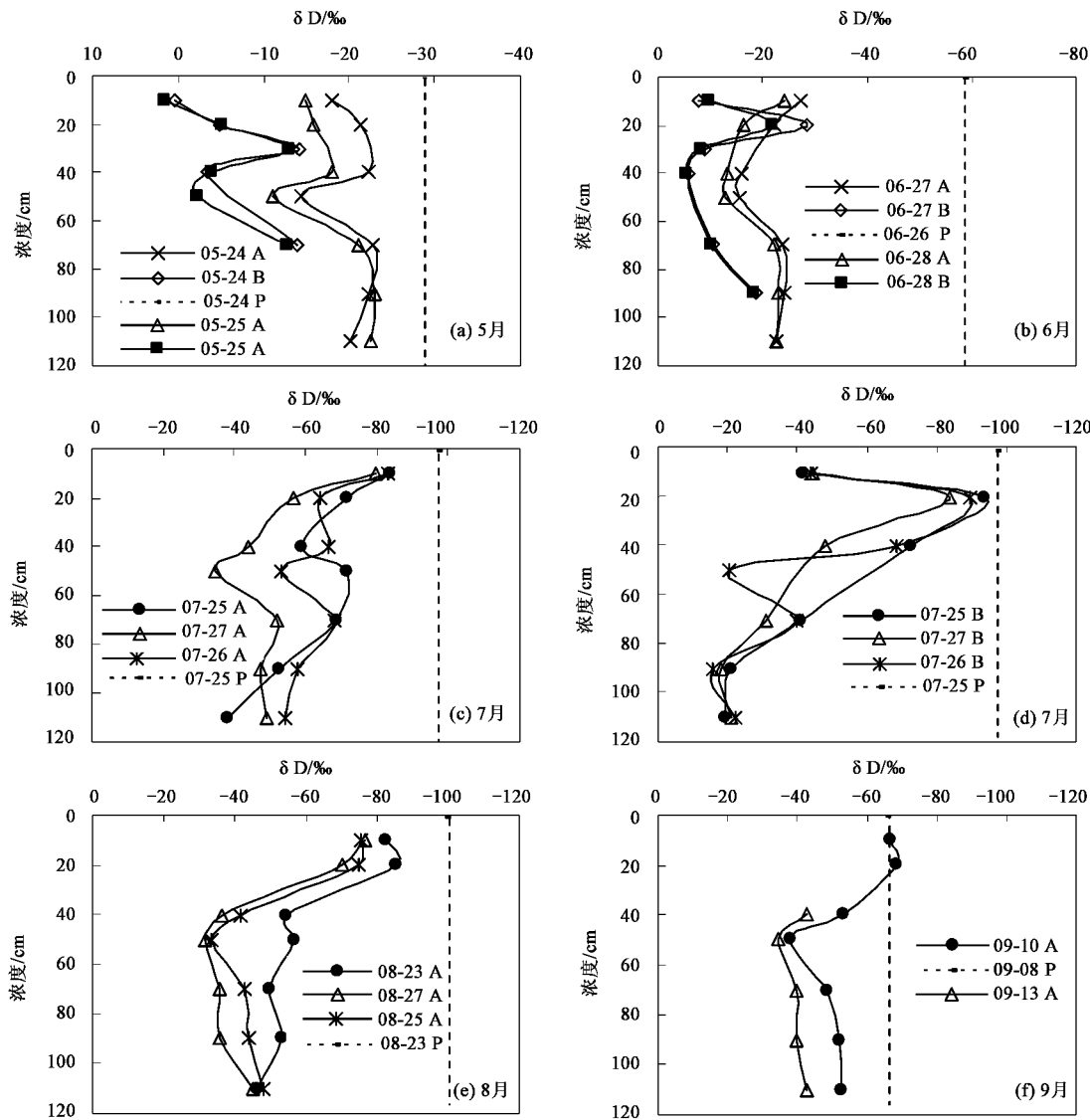
Table 3 Multifactor analysis of variance for the effects of site and season on the isotope values								
偏差来源	¹⁸ O				D			
	自由度	F 值	Sig.	偏差平方和	自由度	F 值	Sig.	偏差平方和
校正模型	65	18.815	0	1 057.00	65	19.571	0	76 428.645
截距	1	2 928.94	0	2 531.38	1	1 538.56	0	92 435.984
土层	7	7.966	0	48.194	7	11.719	0	4 928.666
季节	4	125.204	0	432.84	4	135.115	0	32 470.757
处理	3	41.891	0	108.614	3	46.38	0	8 359.522
土层 × 季节	25	4.941	0	106.768	25	4.55	0	6 834.029
土层 × 处理	16	9.762	0	134.996	16	9.268	0	8 908.826
处理 × 季节	2	2.404	0.096	4.156	2	1.587	0.21	190.713
土层 × 处理 × 季节	8	5.221	0	36.095	8	4.931	0	2 369.821
误差	92			79.513	92			5 527.328
汇总	158			6 635.53	158			308 573.455

影响更强[见图 4(a)和表 1].同时,由图 4 可以发现,50 cm 为蒸发峰常达到的最大值.油茶林 50 cm 以下土壤水分同位素含量是随深度减少,蒸发影响减弱.另外通过图 4(c)还可以推断出,夏季油茶林极端干旱蒸发深度是可以达到 110 cm 甚至更深.

研究区玉米地由于前期蒸发强烈,降水后土壤各层受旧水和新降水的混合影响明显[如图 4(a)、4(b)、4(d)].其中表层 10 cm 土壤水稳定同位素值明显 > 20 cm,且在 20 cm 处形成一个明显的拐点,5 月由于前期降水更少,这种趋势延伸到 30 cm.20 cm 左右可能是由于稻草覆盖的原因,水分容易聚水.受到降水入渗推动混合水向下移动的影响,20~40 cm 同位素值逐渐变大,受大雨推移时甚至可以到达 90 cm[如图 4(d)].故可以推导出玉米的最大蒸发深度应为 90 cm 左右.综合分析油茶林、玉米土壤水蒸发主要受 3 个方面的影响:①受覆盖物和根系分布影

响.玉米地覆盖稻草对表层 0~20 cm 土壤水蒸发影响明显.油茶林为小乔木,存在灌木层和草本层 2 层遮挡,故蒸发程度小于玉米.另外油茶林根系发达,尤其是 0~40 cm 粗根系分布密集,水分通透性强,故蒸发深度又较玉米深.②受取样时间的影响.土壤水样都是在降水中及降雨后连续 2~5d 内所取,这样受降水影响比较大.③受到土壤结构的影响.本区域油茶林 40 cm、50 cm 通常是同位素值急剧变化的拐点,挖掘剖面显示:0~20 cm 为腐殖质层;20~40 (50) cm 为粘土层,基本无砾石;40(50)~90 cm 砾石含量逐渐增多,土壤粘重;90 cm 以下土壤非常粘重.通常情况是湿润锋到达 40~50 cm 土壤中交界面后会停滞不前,直到土壤积聚了一定水头才会继续前进.故蒸发也在 40(50) cm 以上表现最明显.

对于降水后连续抽取土壤水稳定同位素,其表层 10 cm 值变化很小,这表明降水后 2~5 d 蒸发影



A 代表油茶林, B 代表玉米, P 代表降雨

图 4 不同月份土壤水 δD 值连续变化

Fig. 4 δD change of soil water continuously in different months

响不强烈,水分主要以入渗为主,而 20~90 cm 变化比较大,可能与侧向水流或是坡上水流有关,有待进一步研究证实.另外此时植物蒸腾对土壤水同位素值影响非常小,这在以往的研究中也得到过证实^[11,26].

2.2.2.3 土壤水入渗

受到蒸发的影响,降水入渗到土壤中后土壤水同位素值不断富集,同时通过连续取样,垂向剖面便会形成 δD 和 $\delta^{18}O$ 的峰值不断向下推进的情况^[8,20,22,27~29].故通过对降水后土壤水的连续取样,可以对特定时间段的土壤入渗速率进行计算.原理如下:假定同位素峰值在 t_1 时刻所处的位置为 Z_1 ,

在 t_2 时刻同位素峰值下移到 Z_2 位置,则在 $t_2 \sim t_1$ 时间段内,峰值位移速度(降水入渗速度) V 可表示为: $V = (Z_2 - Z_1) / (t_2 - t_1)$.

本研究对油茶林各月典型降水过程后土壤水进行连续取样,探讨降水后 2~5d 的土壤入渗率(如图 4).7 月 25 日降水量为 69.4mm,首日土壤水样是在雨中取,最大峰值出现在 40 cm, δD 值为 $-59.12‰$,7 月 26 日最大峰值在 50 cm, δD 值为 $-53.31‰$,7 月 27 日最大峰值在 50 cm, δD 值为 $-34.77‰$,表明首日入渗率约为 100 mm/d,次日入渗缓慢,入渗率明显降低;8 月 23 日降水量为 49.6 mm,首日土壤水样是在雨后 10 h 取,最大峰值在 40 cm, δD 值为

-54.25‰,8月25日最大峰值在50 cm,δD值为-33.19‰,8月27日最大峰值在50 cm,δD值为-31.75‰,降水后前2 d平均入渗率约为50 mm/d,第3~4 d入渗率下降明显.而5月24日降水量为31.2 mm,5月24日、25日2 d最大峰值都在50 cm;6月26日降水量为17 mm,6月27日、28日2 d峰值同样都出现在50 cm.由此可知,油茶林水分前期入渗表现为当降水量>69.4 mm时,降水后第2~3 d入渗明显,入渗率约为100 mm/d,之后入渗率明显下降,50 cm常成为阻隔层;而当降水量<50 mm时,入渗速率更小,土壤水或很快通过蒸发和植被蒸腾的形式被消耗.玉米由于根系比较浅,通透性差,单次降水后入渗率较低,降水后2~5d同位素值显示不出入渗率.当然土壤入渗是一个受土壤结构、质地、湿度、异质性等多因素综合影响的过程,更加详细地入渗过程分析需要更长时间的连续性取样.

3 结论

(1)建立了湘西北桃源地区大气降水线(LMWL): $\delta D = 7.432 \delta^{18}O + 0.605$, $R^2 = 0.953$, $n = 36$.其斜率和截距均低于全球及长沙地区大气降水线,表明大气降水稳定性同位素存在明显的降水量效应、季节效应.

(2)土壤水氢氧同位素值较降水值富集,主要是受前期降水形成的混合水样的影响,蒸发影响次之.油茶林蒸发强度小于玉米地,但蒸发深度较玉米地深.油茶林0~50 cm、玉米0~40 cm土壤水氢氧同位素值表现出随深度增大而增大,主要受降水入渗推动混合水向下移动引起,但干旱时段降水后表现出相反的趋势;油茶林50 cm、玉米40 cm以下土壤水氢氧同位素值随深度增大而减少,蒸发影响微弱.

(3)油茶林水分入渗表现为当大雨后2~3 d入渗明显,入渗率约为100 mm/d,之后入渗率减慢,50 cm常成为阻隔层;玉米由于根系分布比较浅,通透性差,入渗率较低.

(4)利用稳定氢氧同位素研究湿润半湿润地区土壤水分运移可以为人们提供更多土壤内部的信息,但是需要进一步加长取样时间及加密取样间隔.

致谢:中国科学院地理科学与资源研究所刘鑫博士、杨京荣老师等在试验过程中给予了指导与帮助,在此一并感谢.

参考文献:

[1] Carey G, Xia H F. A stable isotope study of soil water: evidence for

mixing and preferential flow paths[J]. *Geoderma*, 2004, **119**: 97-111.

[2] Jessica A R, Carey A G. An oxygen isotope study of seasonal trends in soil water fluxes at two sites along a climate gradient in Washington state (USA)[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **328**: 375-387.

[3] 陈洪松, 邵明安, 王克林, 等. 上方来水对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. *水科学进展*, 2005, **16**(2): 233-237.

[4] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区山桃灌木林地土壤水分过耗与调控恢复[J]. *土壤学报*, 2003, **40**(5): 691-696.

[5] 王晓燕, 陈洪松, 王克林, 等. 不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(2): 110-113.

[6] 陈家宙, 吕国安, 王石, 等. 红壤干旱过程中剖面水分特征与土层干旱指标[J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(4): 11-16.

[7] Barnes C J, Allison G B. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils: 3. Theory for non-isothermal water movement[J]. *Journal of Hydrology*, 1984, **74**: 119-135.

[8] Walker G R, Hughs M W, Allison G B, *et al.* The movement of isotopes of water during evaporation from a bare soil surface[J]. *Journal of Hydrology*, 1988, **97**: 181-197.

[9] Zimmermann U, Münnich K O, Roether W. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes. Isotope techniques in the hydrologic cycle[J]. *Am Geophys Monogr*, 1967b, **11**: 28-36.

[10] Liu B, Phillips F, Hoines S, *et al.* Water movement in desert soil traced by hydrogen and oxygen isotopes, chloride, and chlorine-36, southern Arizona[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **168**: 91-110.

[11] Newman B D, Campbell A R, Wilcox B P. Trace-based studies of soil water movement in semi-arid forests of New Mexico[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, **196**: 251-270.

[12] Gehrels J C, Peeters J E M, De Vries J J, *et al.* The mechanism of soil water movement as inferred from ^{18}O stable isotope studies[J]. *Journal Hydrological Science*, 1998, **43**: 579-594.

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

[14] Heish J C C, Chadwick O A, Kelly E F, *et al.* Oxygen isotopic composition of soil water: quantifying evaporation and transpiration[J]. *Geoderma*, 1998b, **82**: 269-293.

[15] Lee K S, Kim J M. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **345**: 199-211.

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

[17] 田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 等. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化[J]. *土壤学报*, 2002, **39**(3): 289-294.

[18] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, **133**: 1702-1703.

[19] 章新平, 姚檀栋. 我国降水的 ^{18}O 的分布特点[J]. *地理学报*, 1998, **53**(4): 356-364.

[20] Bengtsson L, Saxena R K, Dressie Z. Soil water movement estimated

from isotope tracers[J]. Journal Hydrological Science, 1987, **32**: 497-520.

[21] Allison G B. The relationship between ^{18}O and deuterium in water in sand columns undergoing evaporation[J]. Journal of Hydrology, 1982, **55**: 163-169.

[22] Allison G B, Barnes C J. Estimation of evaporation from non-vegetated surfaces using natural deuterium[J]. Nature, 1983, **301**: 143-145.

[23] Allison G B, Hughes M W. The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region[J]. Journal of Hydrology, 1983, **60**: 157-173.

[24] Brunel J P, Walker G R, Dighton J C, *et al.* Use of stable isotopes of water to determine the origin of water used by the vegetation and to partition evapotranspiration. A case study from HAPEX-Sahel[J]. Journal of Hydrology, 1997, **188**: 466-481.

[25] Shurbaji A R M, Phillips F M. A numerical model for the movement of H_2O , H_2^{18}O , and ^2HHO in the unsaturated zone[J]. Journal of Hydrology, 1995, **171**: 125-142.

[26] Brodersen C, Pohl S, Lindenlaub M, *et al.* Influence of vegetation structure on isotope content of throughfall and soil water[J]. Hydrology Processes, 2000, **14**: 1439-1448.

[27] Barnes C J, Allison G B. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils: 1. Theory[J]. Journal of Hydrology, 1983, **60**: 141-156.

[28] 崔军, 安树青, 徐振, 等. 卧龙巴郎山高山灌丛降雨和穿透水稳定性氢氧同位素特征研究[J]. 自然资源学报, 2005, **20** (4): 660-668.

[29] 侯士彬, 宋献芳, 于静洁, 等. 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析[J]. 资源科学, 2008, **30**(1): 86-92.