

黄土区典型小流域包气带土壤水同位素特征

柯浩成¹, 李占斌^{1,2}, 李鹏¹, 肖列¹, 张军¹, 刘莹¹, 赵宾华¹, 常恩浩¹, 王琦¹

(1. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过野外调查与室内试验相结合的方法, 对王茂沟流域降水及5种土地利用类型土壤剖面稳定氢氧同位素特征进行对比分析, 为黄土区土壤水分运移机制、模型参数识别及生态保护与重建提供科学依据。结果表明: (1) 降水与5种土地利用方式下土壤水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的变化范围分别为 $(-118.08\text{\textperthousand}) \sim (-14.37\text{\textperthousand})$, $(-16.13\text{\textperthousand}) \sim (1.41\text{\textperthousand})$ 和 $(-92.36\text{\textperthousand}) \sim (-34.98\text{\textperthousand})$, $(-12.48\text{\textperthousand}) \sim (-5.01\text{\textperthousand})$, 平均值分别为 $-37.36\text{\textperthousand}$, $-5.65\text{\textperthousand}$ 和 $-60.18\text{\textperthousand}$, $-7.81\text{\textperthousand}$ 。 (2) 不同土地利用类型的土壤水氢氧同位素变化存在显著性差异, 土壤通透性草地>梯田>林地>坝地>坡耕地, 表层土壤水分的蒸发分馏程度梯田>草地>坝地>坡耕地>林地。 (3) 林地和草地“优先流”现象明显, 草地“优先流”程度最大, 林地能显著延伸“优先流”发生路径。 (4) 草地、林地和梯田分别在160, 200, 200 cm土层及以下氢氧同位素值相对稳定, 坝地和坡耕地可能对地下水水质与补给造成较大影响。

关键词: 降水; 土壤水; 氢氧同位素; 水分运移; 黄土区

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)03-0298-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.049

Soil Water Isotope Characteristics of the Vadose in a Typical Small Watershed on the Loess Plateau of China

KE Haocheng¹, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng¹, XIAO Lie¹, ZHANG Jun¹,

LIU Ying¹, ZHAO Binhua¹, CHANG Enhao¹, WANG Qi¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In this study, stable isotope compositions of the precipitation and soil water of five different kinds of land use patterns in Wangmao ditch small watershed on the Loess Plateau were analyzed, the aim was to understand the characteristics of stable isotopes along the soil profile, and provide a scientific basis for understanding the mechanisms of soil water movement, the identification of model parameters and the ecological protection and reconstruction. The results showed that: (1) The variation ranges of δD (or $\delta^{18}O$) in the precipitation was from $-118.08\text{\textperthousand}$ (or $-16.13\text{\textperthousand}$) to $-14.37\text{\textperthousand}$ (or $1.41\text{\textperthousand}$), with a mean value of $-37.36\text{\textperthousand}$ (or $-5.65\text{\textperthousand}$). The variation range of δD (or $\delta^{18}O$) in soil water of five kinds of land use was from $-92.36\text{\textperthousand}$ (or $-12.48\text{\textperthousand}$) to $-34.98\text{\textperthousand}$ (or $-5.01\text{\textperthousand}$), with a mean value of $-60.18\text{\textperthousand}$ (or $-7.81\text{\textperthousand}$). (2) There were significant differences in the changes of hydrogen and oxygen isotope. Soil permeability of the five kinds of land use was as follows: grassland > terraced fields > forest land > dam land > slope cropland. Soil water evaporation fractionation in different land use patterns was as follows: terraced fields > grassland > dam land > slope cropland > forest land. (3) The woodland and grassland “preferential flow” phenomenon was obvious; the grassland “preferential flow” was the maximal, and the woodland could extend the “preferential flow” path obviously. (4) Hydrogen and oxygen isotopic values in the 160, 200 and >200 cm soil layers of the grassland, woodland, and terrace were relatively stable. The dam land and sloping farmland might affect the quality and recharge of groundwater significantly.

Keywords: precipitation; soil water; hydrogen and oxygen isotope; water movement; the Loess Plateau

黄土区土壤水在非饱和带中运移的机理问题,是长期以来学者们关心的热点话题之一^[1]。黄土区土地利用方式是影响流域水文循环和水土资源演变过程的主要驱动力之一^[2]。土壤水稳定同位素组成能够揭示土壤水文过程中的一些信息,包括入渗、蒸发、蒸腾等,而这些信息用其他技术获取十分困难^[3-4]。孙晓旭等^[5]研究了降雨入渗过程中不同水体的同位素变化规律。Yidana 等^[6]建立了描述土壤水稳定同位素剖面分布的数值模型。包为民等^[7]研究了降雨入渗下土壤水同位素特征。王仕琴等^[8]对华北平原降水入渗过程中的氢氧同位素变化进行了研究。程立平等^[9]利用氢氧同位素研究了黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响。田立德等^[10]对青藏高原中部的土壤水同位素规律进行了研究。王锐等^[11]对黄土塬区土壤剖面的土壤水氢氧同位素特征进行了研究。孙芳强等^[12]研究了新疆三工河流域不同土地利用土壤水同位素特征。Shiao 等^[13]研究表明植物蒸腾作用不会造成土壤水中氢氧稳定同位素的分馏。但利用稳定同位素技术研究黄土区生态建设条件下土壤水同位素特征罕有报道^[14]。因此,本文以黄土区绥德王茂沟流域为研究区域,对降水及不同土地利用土壤剖面 200—300 cm 以上土层采样,研究土壤水氢氧稳定同位素剖面分布及其动态变化特征,为揭示黄土区土壤水分运移机制、模型参数识别和生态保护与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市绥德县王茂沟流域,流域面积 5.97 km²,位于东经 110°20'26"–110°22'46",北纬 37°34'13"–37°36'03"之间,属于温带大陆性气候。流域多年平均降雨量 513 mm,其中 6—9 月降雨量占年降雨量的 70%以上。流域内实施了大规模的生态建设工程,土地利用主要包括梯田、坝地、草地、林地和坡耕地。流域沟壑密度 4.3 km/km²,为典型的黄土丘陵沟壑地貌,沟间地占 53.3%,沟谷地占 46.7%,海拔 940~1 188 m,沟道底部至峁顶相对高差 100~200 m。研究区土壤理化性质见表 1。

表 1 研究区土壤理化性质

类型	容重/ (g·cm ⁻³)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	土壤 类型
坡耕地	1.21±0.11	2.54	0.13	0.44	黄绵土
林地	1.40±0.13	3.24	0.23	0.41	黄绵土
草地	1.36±0.12	2.99	0.23	0.40	黄绵土
梯田	1.28±0.09	2.89	0.21	0.42	黄绵土
坝地	1.29±0.06	3.49	0.56	0.57	黄绵土

1.2 研究方法

1.2.1 气象数据采集

本研究主要利用 2014 年 7

月—2014 年 9 月期间的气象数据,所需数据来源于位于流域中部开阔地带的 Vantage pro2 型自动气象站。获取的气象要素包括:平均地表温度(20.17 °C)、降水量(297 mm)、平均相对湿度(61%)、平均风速(0.56 m/s)。

1.2.2 样品采集与测定方法 于 2014 年 7 月 16 日—9 月 17 日发生降水事件时(降水量>2 mm),用雨量计收集降水样品,用 100 mL 的聚乙烯密封瓶对每个样品取 3 个重复,用 Parafilm 封口膜密封防止蒸发作用引起的同位素分馏,及时放入-20 °C 冰箱冷冻,并带回西安理工大学生态水利工程国家重点实验室测试分析,降雨期间每 15 min 采集一次,共采集降水样品 75 个。采样期间,共发生 3 次降雨事件,分别为 7 月 20 日,7 月 21 日和 7 月 29 日。样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值利用 LGR DLT-100 液态水同位素分析仪测定。

选取流域内典型样地:林地、草地、坡耕地、坝地和梯田。为避免坡向因素的影响,样地均选在阳坡,每隔 4 d 取 1 次样,采集深度 200—300 cm,每 20 cm 为一层,用 100 mL 的聚乙烯密封瓶对每个样品取 3 个重复,共采集 5 种土地利用类型的土壤水样品 276 个,用 Parafilm 封口膜密封防止蒸发,及时放入-20 °C 冰箱冷冻,并带回西安理工大学生态水利工程国家重点实验室测试分析。土壤水分利用 LI-2000 植物—土壤水分真空抽提设备抽提。抽提水分的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值使用 LGR DLT-100 液态水同位素分析仪测定。研究区位置见图 1。

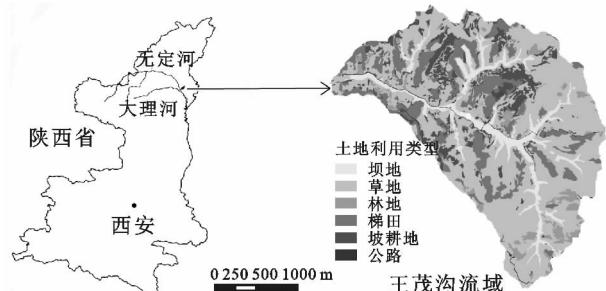


图 1 研究区位置

1.2.3 氢氧稳定同位素分析 样品的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值的测量精度分别为 2‰ 和 0.3‰。测量的 D 和 ^{18}O 同位素比率相对于 Vienna “标准平均海洋水”(VSMOW) 的千分差,表示为:

$$\delta X / \text{‰} = \frac{R_{\text{样品}} - R_{\text{标样}}}{R_{\text{标样}}} \times 1000 \quad (1)$$

$$R_{\text{样品}} = ^{18}O / ^{16}O_{\text{样品}} \text{ 或 } H / D_{\text{样品}} \quad (2)$$

$$R_{\text{标样}} = ^{18}O / ^{16}O_{\text{标样}} \text{ 或 } H / D_{\text{标样}} \quad (3)$$

式中: δX 为 D 或 ^{18}O 的千分差; $R_{\text{样品}}$ 为样品中 D 或 ^{18}O 的比率; $R_{\text{标样}}$ (VSMOW 标准大洋水) 为标准水样中 D 或 ^{18}O 的比率, $\delta > 0$ 时,样品较标准水样“重”,即氘或 ^{18}O 富集; $\delta < 0$ 时,样品较标准水样“轻”,即氘或 ^{18}O 贫化。为了保证各样品间不产生互相干扰,每个

样品进行 6 次注射,并排除前 2 次数据以消除记忆效应。此外,对样品注射量(2.50×10^{16} ~ 4.50×10^{16} 个水分子,波动范围在 $\pm 3.00\%$ 之间)、温度(变化范围在 1 ℃ 以内)、 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测量精度进行检查,不同时满足条件的测试结果从计算结果中剔除。

1.2.4 数据处理方法 数据处理利用 Origin 8.5 软件作图,采用 Excel 2013 和 SPSS 20.0 软件进行单变量方差分析(ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 黄土区降水及土壤水氢氧稳定同位素组成特征

由表 2 可知,研究区 5 种土地利用类型的稳定同

位素变化范围依次为坝地>林地>梯田>草地>坡耕地,而研究区气象条件基本相同,但氢氧同位素值的变化存在显著差异($p<0.01$),表明生态建设措施改变了土壤水分的再分布及迁移过程。此外,从均值变化大小可以看出,草地>梯田>林地>坝地>坡耕地,表明生态建设措施改变了土壤的通透性,土壤通透性由大到小依次为草地、梯田、林地、坝地和坡耕地。由 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的标准差大小可知,5 种土地利用土壤水氢氧同位素组成变化远小于降水同位素变化,表明不同时段降水(新水)进入土壤后与土壤原有水(老水)发生了混合。

表 2 降水与 5 种土地利用类型的氢氧同位素统计特征

统计因子	$\delta D/\text{‰}$				$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
坝地	-34.98	-92.36	-57.81	7.49	-5.01	-12.48	8.6	1.08
梯田	-41.22	-77.01	-61.96	7.94	-4.41	-10.03	8.62	1.22
林地	-38.46	-74.29	-60.96	7.86	-5.18	-10.11	6.83	1.05
草地	-38.46	-73.99	-62.37	8.29	-5.18	-9.81	7.13	0.91
坡耕地	-41.97	-71.40	-57.80	7.49	-5.16	-9.23	8.60	1.08
降水	14.37	-118.08	-37.36	39.25	1.41	-16.13	-5.65	4.86

研究区雨季降水线方程为: $\delta D = 7.99\delta^{18}\text{O} + 7.82$ ($R^2 = 0.99$, $N = 75$) (图 2), 斜率和截距均小于全球大气降水线($\delta D = 8.14\delta^{18}\text{O} + 10$)^[15]的斜率和截距,这与研究区位于黄土区、次降雨量小、空气湿度相对较低、降水降落过程中经历了强烈的蒸发有关^[16]。坝地土壤水雨季蒸发线为: $\delta D = 7.568\delta^{18}\text{O} + 0.68$ ($R^2 = 0.97$, $N = 60$), 梯田土壤水雨季蒸发线为: $\delta D = 6.79\delta^{18}\text{O} - 7.93$ ($R^2 = 0.87$, $N = 60$), 林地土壤水雨季蒸发线为: $\delta D = 6.79\delta^{18}\text{O} + 0.68$ ($R^2 = 0.92$, $N = 56$), 草地土壤水雨季蒸发线为: $\delta D = 6.35\delta^{18}\text{O} - 9.87$ ($R^2 = 0.82$, $N = 60$), 坡耕地土壤水雨季蒸发线为: $\delta D = 7.74\delta^{18}\text{O} + 0.23$ ($R^2 = 0.87$, $N = 40$) (图 2), 5 种土地利用方式下土壤水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均分布在雨季降水线两侧且各方程斜率和截距均小于雨季降水线方程的斜率和截距,表明土壤水主要来源于降水补给且进入土壤后在土表层发生了强烈的非平衡分馏,各方程斜率依次为梯田>草地>林地>坡耕地>坝地,可以得出,5 种土地利用土壤水分的蒸发分馏程度从大到小依次为梯田、草地、林地、坡耕地和坝地。

蒸发的净效应使重同位素在土表富集。图 3 为研究区 0—20 cm 土层土壤水与研究区降水氢氧同位素的关系,土壤水中氢氧同位素变化关系为: $\delta D = 7.71\delta^{18}\text{O} + 2.93$ ($R^2 = 0.76$, $N = 20$), 其斜率与雨季降水线方程斜率几乎一致,表明 0—20 cm 土层土壤水受降水的直接影响。

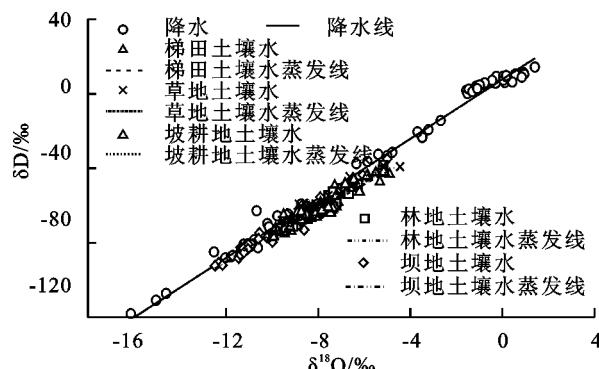


图 2 降水与 5 种土地方式土壤水中氢氧同位素关系

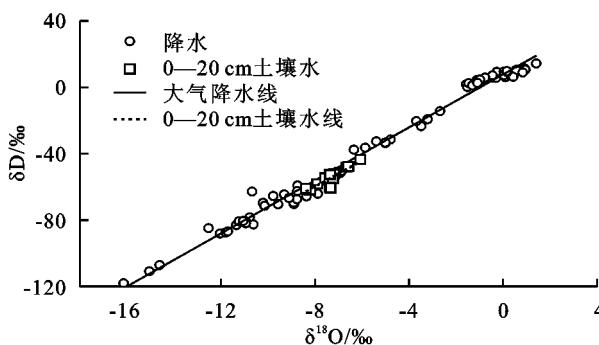


图 3 研究区 0—20 cm 土层土壤水与降雨氢氧同位素组成关系

2.2 浅层土壤水氧同位素组成的动态变化特征

鉴于氢和氧同位素值的线性关系,下面仅以土壤水中的氧同位素值为例分析说明。图 4 为 5 种土地利用 0—20 cm 土层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的动态变化过程。

由图 4 可以看出,5 种土地利用表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的波动幅度远小于研究区雨季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的

波动幅度,较降水同位素稳定,且富集重同位素,表明0—20 cm土层土壤水氧同位素值除受降水的直接影响外,还受土地利用方式的影响。

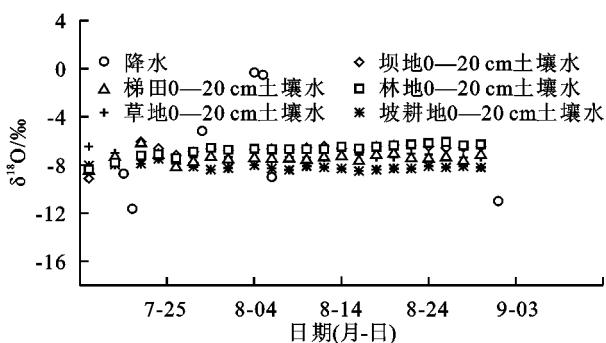


图4 0—20 cm土层土壤水和降水中氧同位素变化

2.3 深层土壤水氧同位素组成的动态变化特征

图5为20—200 cm土层不同土地利用类型土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的动态变化过程。由图5可知,20日和21日发生连续降雨后,20—40 cm土层的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与0—20 cm(图4)土层变化趋势相同,表明0—40 cm土层土壤水受蒸发分馏影响明显。20日和21日降雨 $\delta^{18}\text{O}$

较7月16日土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 贫化,而26日40—80 cm土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值随着时间的推移 $\delta^{18}\text{O}$ 较22日富集明显,一方面,可能是蒸发作用导致40—80 cm土层 $\delta^{18}\text{O}$ 富集;另一方面,可能是土层水分子的扩散作用使部分 $\delta^{18}\text{O}$ 向下移动,使得土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 富集;再者,可能是由于蒸发与混合的双重作用使得40—80 cm土层土壤水中同位素富集,且这种作用影响到了80—120 cm土层,这在Galewsky和Steen-Larsen^[17]的研究中能够得到证实。22日120—180 cm土层土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与16日土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相差不大,而26日120—180 cm土层土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值较16日贫化,可能是由于实施生态建设措施以来,土地的不同利用方式改变了土壤的入渗特性,表明降水在土壤入渗过程中存在滞后效应。29日降雨事件发生后,土壤经历多日的蒸发,土体含水量较低,部分降水到达地表后迅速蒸发损失,对土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值组成影响较小,另一部分通过快速通道迅速以“优先流”的形式到达深层土壤,且不同土地利用方式下“优先流”程度存在差异,这在马祥华等^[18]的研究中可以得到证实。

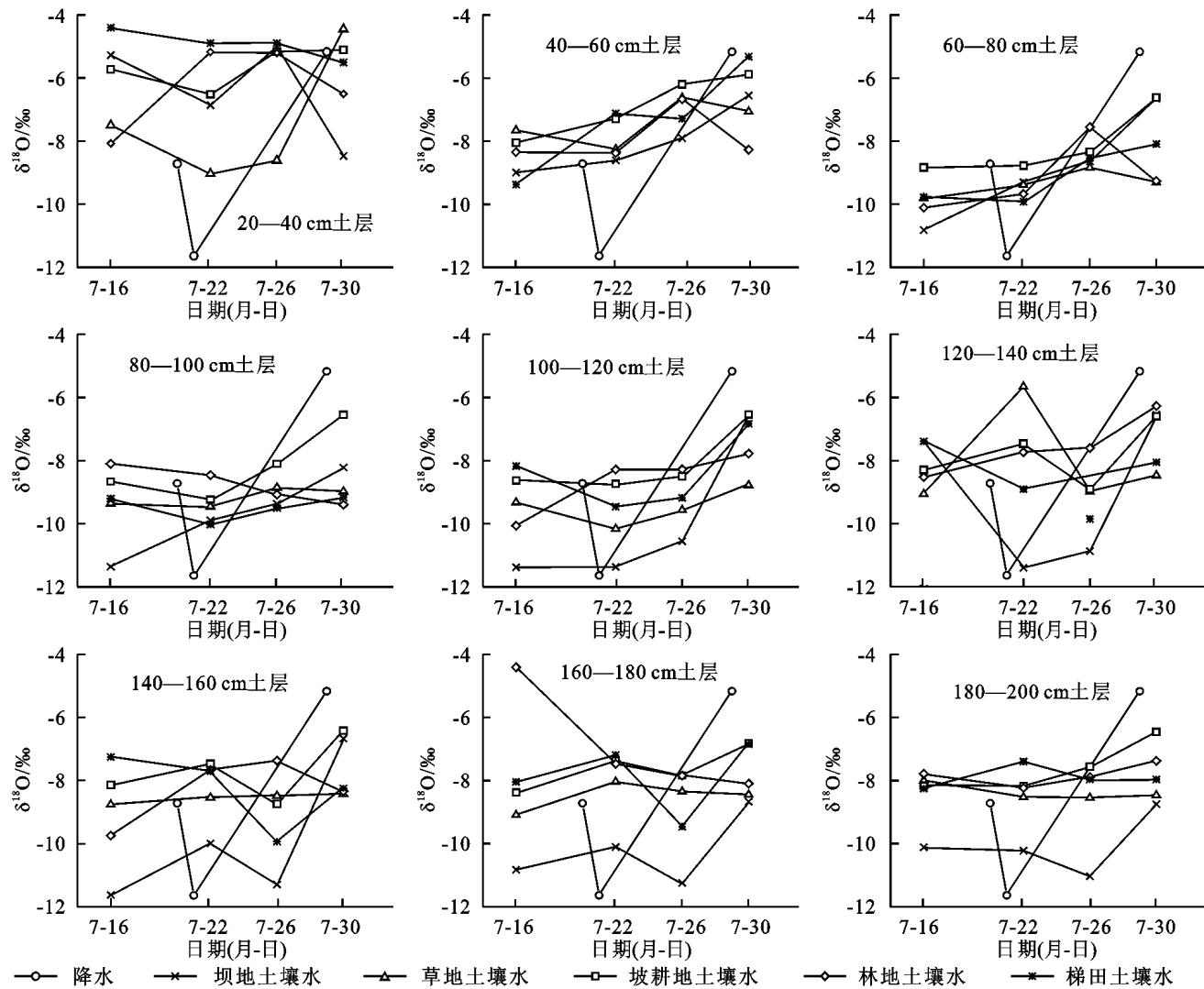


图5 深层土壤水和降水氧同位素变化分析

2.4 不同土地利用类型土壤水分垂向运移的同位素组成分析

从图 6 可以看出,同位素沿土壤剖面的垂直分布具有以下特征:(1)5 种土地利用下氧同位素值沿土壤剖面先增大后减小并发生波动性变化。(2)0—80 cm 土层氧同位素值变化较 80—300 cm 氧同位素值变化大。(3)下层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值保留了上层 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化特征。(4)表层蒸发程度由大到小依次为梯田、草地、坝地、坡耕地、林地。以上表明,降水进入土壤向下入渗的过程中,与土壤自由水发生不同程度的混合,这在王锐等^[11]的研究中已得到证实。

同时可以看出,5 种土地利用土壤剖面 ^{18}O 在 20—40 cm 处相对其他层富集,原因是表层土壤在蒸散的过程中,随着时间的推移,含水量持续减低形成干燥面并逐渐向下运移,而下层土壤水分在毛管力作用下沿水势梯度逐渐向上层运移,在表层受到动力分馏后 ^{18}O 富集,进而于干燥面上形成 ^{18}O 最大富集层。在 ^{18}O 最大富集层沿土壤剖面产生了的 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比率梯度,积累的“重水”一方面由于扩散作用运移,另一方面沿土壤剖面温度梯度运移。

同时由图 6 可知,坝地、林地、梯田和坡耕地在 40 cm 土层处 $\delta^{18}\text{O}$ 值最大,草地在 60 cm 土层处 $\delta^{18}\text{O}$ 值最大,即形成蒸发面。5 种土地利用除草地外, $\delta^{18}\text{O}$ 值沿土壤剖面在 40 cm 土层以下迅速减小,坝地、林地、梯田和坡耕地分别在 100,200,120,80 cm 以下变化较小。不同土地利用方式下土壤剖面的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异较大,这是由于土壤水分在不断蒸发和植被根系引起“优先流”的程度不一致造成的。坝地土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值 220—240 cm 与 240—300 cm 深度处 $\delta^{18}\text{O}$ 值相比,略有减小,可能是该层存在“优先流”所致。草地土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 值沿剖面向下至 140 cm 深度波动幅度差异较其他 4 种土地利用明显,在 220—240 cm 的深度处出现 $\delta^{18}\text{O}$ 值突然增大,可能是土壤水通过“优先流”渗透所致。林地和梯田在 200 cm 土层以上土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异明显,是由于退耕还林措施实施后,根系改变了土壤的孔隙度和物理特性^[19],部分降水经过快速通道以“优先流”方式迅速渗透至深层土壤。坡耕地在 80 cm 以上土层 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化明显,是由于作物(土豆、红薯等)根系较浅,耕作层在 50 cm 的范围内变化,故对深层土壤的 $\delta^{18}\text{O}$ 值影响不大。上述结果表明,退耕还草措施明显增加了 140 cm 土层以上降水入渗的“优先流”程度,较其他 4 种土地利用“优先流”特征明显,这在宋丽娟等^[20]的研究中已得到证实。而退耕还林措施延伸了“优先流”发生的路径。Geldern 等^[21]将 $\delta^{18}\text{O}$ 值误差变化小于 2 倍标准差的深度作为相对稳定的临界深度。试验测定的 $\delta^{18}\text{O}$ 精度为 0.3‰,则 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对稳定的临界误差变化为 0.6‰。草地、林

地和梯田分别在 160 cm,200 cm 和 200 cm 以下土层标准差小于 0.6‰,因此,可以预测草地、林地和梯田分别在 160,200,200 cm 以下土层土壤水的氢氧同位素值相对稳定。

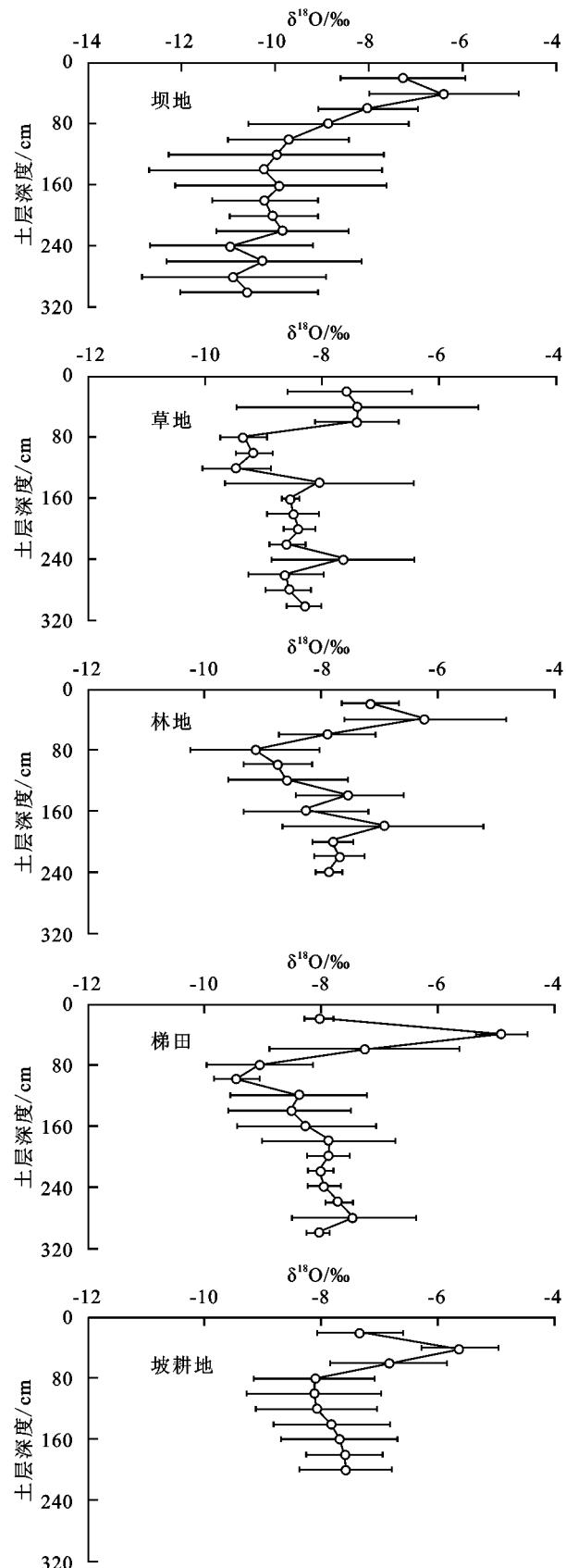


图 6 5 种土地利用土壤剖面平均氧同位素剖面的分布

3 结论

(1)研究区降水与5种土地利用方式下土壤水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化范围分别为 $(-118.08\text{\textperthousand}) \sim (-14.37\text{\textperthousand})$, $(-16.13\text{\textperthousand}) \sim (1.41\text{\textperthousand})$ 和 $(-92.36\text{\textperthousand}) \sim (-34.98\text{\textperthousand})$, $(-12.48\text{\textperthousand}) \sim (-5.01\text{\textperthousand})$,平均值分别为 $(-37.36 \pm 39.25)\text{\textperthousand}$, $(-5.65 \pm 4.86)\text{\textperthousand}$ 和 $(-60.18 \pm 7.96)\text{\textperthousand}$, $(-7.81 \pm 1.07)\text{\textperthousand}$ 。表层0—20 cm土壤水受降水直接影响且蒸发程度为梯田>草地>坝地>坡耕地>林地。

(2)研究区土壤水主要受降水补给。5种土地利用类型蒸发分馏程度依次为梯田>草地>林地>坡耕地>坝地。坝地、林地、梯田和坡耕地在40 cm土层处形成蒸发面;草地在60 cm土层处形成蒸发面。林地和草地“优先流”现象明显,草地“优先流”程度最大,林地能显著延伸“优先流”发生路径。

(3)草地、林地和梯田分别在160,200,200 cm土层以下土壤水的氢氧同位素值相对稳定,坝地和坡耕地在采样深度内土壤氢氧同位素未达到相对稳定,表明坝地和坡耕地可能对地下水水质与补给产生较大的影响,未来研究中需进一步增加采样深度;降水在向土壤水转换的过程中除了受降水特征影响外,还受植被类型、蒸散发、老水含量等因素影响。因此,有必要对黄土区典型小流域土壤水、根系吸水的氢氧同位素值的动态变化做进一步研究。

参考文献:

- [1] 马雪宁,张明军,李亚举,等.土壤水稳定同位素研究进展[J].土壤,2012,44(4):554-561.
- [2] 董磊华,熊立华,于坤霞,等.气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J].水科学进展,2012,23(2):278-285.
- [3] Stumpp C, Maloszewski P. Quantification of preferential flow and flow heterogeneities in an unsaturated soil planted with different crops using the environmental isotope $\delta^{18}\text{O}$ [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(3/4): 407-415.
- [4] Li F, Song X, Tang C, et al. Tracing infiltration and recharge using stable isotope in Taihang Mt. North China[J]. Environmental Geology, 2007, 53(7): 687-696.
- [5] 孙晓旭,陈建生,史公勋,等.蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律[J].农业工程学报,2012,28(4):100-105.
- [6] Yidana S M, Fynn O F, Adomako D. Estimation of evapotranspiration losses in the vadose zone using stable isotopes and chloride mass balance method[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 1-18.
- [7] 包为民,王涛,胡海英,等.降雨入渗条件下土壤水同位素变化实验[J].中山大学学报(自然科学版),2009,48(6): 132-137.
- [8] 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.
- [9] 程立平,刘文兆,李志,等.长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J].水科学进展,2016,27(5):1-10.
- [10] 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.
- [11] 王锐,刘文兆,宋献方.黄土塬区土壤水分运动的氢氧稳定同位素特征研究[J].水土保持学报,2014,28(3): 134-137,184.
- [12] 孙芳强,尹立河,马洪云,等.新疆三工河流域土壤水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征及其补给来源[J].干旱区地理,2016,39(6):1298-1304.
- [13] Griffis T J, Wood J D, Baker J M, et al. Investigating the source, transport, and isotope composition of water vapor in the planetary boundary layer[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2016, 16(9): 1-36.
- [14] 王贺,李占斌,马波,等.黄土高原丘陵沟壑区流域不同水体氢氧同位素特征:以纸坊沟流域为例[J].水土保持学报,2016,30(4):85-90,135.
- [15] Song X, Wang S, Xiao G, et al. 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[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(9): 1376-1388.
- [16] 陈曦,李志,程立平,等.黄土塬区大气降水的氢氧稳定同位素特征及水汽来源[J].生态学报,2016,36(1):98-106.
- [17] Galewsky J, Steen-Larsen H C, Field R D, et al. Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle[J]. Reviews of Geophysics, 2016, 54(2): 809-865.
- [18] 马祥华,焦菊英,温仲明,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究[J].水土保持研究,2005,12(1):17-21.
- [19] 宇苗子.黄土塬区小流域土地利用变化对土壤水力特征的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [20] 宋娟丽.黄土高原草地土壤质量特征及评价研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [21] Geldern R V, Barth J A C. Isotopic Landscapes in Bioarchaeology: Oxygen and hydrogen stable isotopes in earth's hydrologic cycle [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2016.