

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*

程立平^{1,2} 刘文兆^{1**}

(¹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; ²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 对陕西省长武县黄土塬区降水及主要土地利用方式下0~20 m剖面土壤水进行采样和稳定同位素测定,研究了该区深层土壤水稳定同位素特征及土壤水运动机制.结果表明:长武塬区大气降水线方程为 $\delta D = 7.39\delta^{18}O + 4.34$ ($R^2 = 0.94$, $n = 71$),其降水稳定同位素值具有明显的冬春高、夏秋低的季节变化特征.土壤水稳定同位素值落于当地大气降水线下侧,且高于7—10月降水稳定同位素值,该区土壤主要接受同位素值偏负的夏秋降水的补给.土壤剖面上,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.对比降水和土壤水的稳定同位素值变化发现,在黄土塬区,活塞流和优先流并存于降水入渗过程中,但优先流入渗的发生与土地利用方式存在一定关系.通常情况下,高耗水型人工林草因水分负平衡形成的土壤干层将减小优先流发生的可能性,而农田、荒草地等土地利用方式均易发生优先流形式的降水入渗,从而对深层土壤水分或地下水形成补给.

关键词 黄土塬区 降水 土壤水 稳定同位素 土地利用

文章编号 1001-9332(2012)03-0651-08 中图分类号 S124.2, S152.7 文献标识码 A

Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland. CHENG Li-ping^{1,2}, LIU Wen-zhao¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chin. J. Appl. Ecol.* 2012 23(3): 651-658.

Abstract: In this study, the precipitation over the Loess Tableland in Changwu County of Shaanxi Province and the soil water in 0-20 m loess profiles under different land use patterns on the Tableland were sampled, and their isotope compositions were analyzed, aimed to understand the characteristics of stable isotopes in the soil water and the mechanisms of the soil water movement. In the study area, the equation of the local meteoric water line (LMWL) was $\delta D = 7.39\delta^{18}O + 4.34$ ($R^2 = 0.94$, $n = 71$), and the contents of the stable isotopes in the precipitation had an obvious seasonal variation of high in winter and spring and low in summer and autumn. The contents of the stable isotopes in the soil water were fell on the underside of the LMWL, and higher than those in the precipitation from July to October, indicating that the soil water was mainly replenished by the precipitation with lower stable isotope contents in summer and autumn. In the soil profiles of different land use patterns, the stable isotope contents in soil water tended to be the same with the increasing soil depth; while under the same land use patterns, the water's stable isotope composition in shallow soil layers changed greatly with time, but changed less with increasing depth. Through the comparison of the stable isotope contents in precipitation and in soil water, it was observed that the piston flow and preferential flow on the Tableland were coexisted in the process of precipitation infiltration, and the occurrence of the preferential flow had a certain relation with land use pattern. Generally,

* 国家自然科学基金面上项目(51179161)和国家自然科学基金青年科学基金项目(41101025)资助.

** 通讯作者. E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

2011-08-21 收稿 2011-12-29 接受.

the soil desiccation caused by the negative water balance resulted from the artificial plantations of high water consumption could reduce the probability of preferential flow occurrence, whereas the precipitation infiltration in the form of preferential flow could easily occur on the farmland or natural grassland so that the soil water in deep layers or the ground water could be replenished.

Key words: Loess Tableland; precipitation; soil water; stable isotope; land use.

通常情况下,降水是黄土塬区土壤水和地下水的唯一补给来源.而降水是如何穿过深厚的黄土包气带补给地下水是学者们长期以来所关心的问题^[1],深入揭示黄土中水分运移机制对于研究降水入渗补给地下水过程至关重要.受降水入渗、土壤蒸发、土壤水分运动等多种因素的影响,土壤水中稳定同位素值处于不断的变化当中.稳定同位素技术可为分析土壤水分运移提供更有效的信息,因而在研究黄土塬区土壤水分运动与循环方面具有更大的优势.Zimmermann 等^[2-3]较早将氢氧同位素技术应用于土壤水分研究,报道了不饱和层土壤水分运动机制以及土壤蒸发所引起的同位素指数剖面分布.随后,大量土壤水同位素组成的土柱模拟和田间试验研究相继展开,如 Barnes 和 Allison^[4]建立了描述土壤水同位素剖面分布的数学模型,并利用其研究土壤水分蒸发.与蒸发的影响有别,植物蒸腾不能引起同位素的分馏,因此长时间序列的土壤水同位素数据可以用来定量研究土壤水蒸发和蒸腾比率^[5].一般来说,土壤水分运动主要有两种机制:活塞流和优先流.活塞流模式中,土壤水分成层推进,即新水取代旧水并将其推向深层土壤^[3];优先流模式中,新水通过一些“快速通道”迅速到达深层土壤,而不与上层旧水混合^[6-7].因此,不同的土壤水分运动模式具有不同的土壤水同位素分布剖面.通过对比降水、土壤水和井水同位素值变化特征,可以确定土壤水运动机制以及潜水补给路径^[8-9].国内土壤水同位素研究起步较晚,但发展迅速.田立德等^[10]研究了青藏高原中部土壤水稳定同位素的变化;许土国等^[11]对扎龙湿地包气带土壤水分垂直运移的稳定同位素进行研究;Song 等^[12]和侯士彬等^[13]利用氢氧稳定同位素对太行山区典型植被的降水-土壤水-地下水转化关系进行了研究;Song 等^[7]和王仕琴等^[14]报道了华北平原降水入渗过程的稳定同位素特征;田日昌等^[15]研究了湘西北红壤丘陵区土壤水运移的稳定性同位素特征;李嘉竹和刘贤赵^[16]介绍了氢氧同位素技术在土壤-植物-大气连续体水分循环研究中的应用进展.但目前对黄土高原地区土壤水同位素特征,尤其是深层土壤水同位素变化的研

究比较少见^[17-18].为此,本文以黄土高原南部长武塬区为试验点,对降水及不同土地利用条件下 0~20 m 剖面土壤水采样并进行稳定同位素分析,研究了土壤水稳定同位素剖面分布及变化特征,以期发现黄土塬区降水入渗规律,为揭示黄土区深层土壤干燥化形成的水动力学机制及进一步研究黄土塬区潜水补给提供依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区为中国科学院长武农业生态试验站(35°14' N, 107°40' E)所在的黄土塬面(图 1),海拔 1220 m.研究区域为典型的黄土塬区,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 9.1 °C, >0 °C 年积温 3029 °C,年均降水量 578 mm,降水年际变化较大,且年内分布不均,7—9 月降水量占全年降水总量的 55% 以上.土壤为黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,根据国际制土壤颗粒分级标准,0~20 m 黄土剖面内,粉粒(0.002~0.02 mm)含量最高,在 35%~52%,为众数粒级;其次为砂粒(0.02~1 mm),其含量在 25%~40%,但 0.25~1 mm 的粗砂粒含量很低;含量最低的为粘粒(<0.002 mm),在 20%~30%.黄土塬区非饱和层深厚,地下水埋深 40~

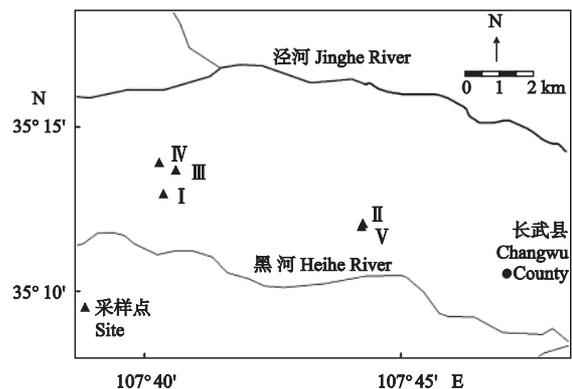


图 1 研究区域及样点分布示意图

Fig. 1 Sketch map of the study area and the location of investigated sites.

I: 荒草地 Nature grassland; II: 连作小麦地 Wheat field; III: 苹果园 Apple orchard; IV: 苜蓿草地(8 年) 8-year-old alfalfa grassland; V: 苜蓿草地(23 年) 23-year-old alfalfa grassland. 下同 The same below.

80 m $\rho \sim 10$ m 黄土剖面田间持水量和凋萎湿度分别为(21.16% \pm 0.86% 和 7.46% \pm 0.65% (质量含水量,下同),土壤容重在 1.23 \sim 1.44 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ [19]。

1.2 水样采集及分析

降水水样采集: 2005 年 3—10 月、2009 年 11 月至 2010 年 10 月在长武站气象观测场以天为时间单位采集雨量筒内水样。降水量由雨量筒测定。

土壤水样采集: 在长武塬面上选择荒草地、连作小麦地、苹果园和苜蓿草地(8 年、23 年)为研究对象(图 1),采用土钻法钻取不同深度土壤样品,现场密封带回实验室,采用真空蒸馏技术[20]提取土壤水样。第 1 次采样时间为 2009 年 10 月底,取样深度 20 m;第 2 次采样时间为 2010 年 4 月 30 日,取样深度 4 m;第 3 次采样时间为 2010 年 11 月 2 日,取样深度 10 m。样品采集深度 $\rho \sim 1$ m 土层分别在 0.3、0.5、1 m 深处取样,1 \sim 3 m 土层每 0.5 m 间隔采样,3 m 以下土层每 1 m 间隔采样。每类土地利用方式每次取一个剖面土样提取土壤水样。所有水样采集后立刻装入 10 mL 玻璃瓶密封冷藏保存。

水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析: 2005 年降水样在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的环境同位素分析实验室测定,采用 TC/EA 法(质谱仪 Finnigan MAT253)测定水样内 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 含量。 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的仪器分析精度分别为 $\pm 2.0\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ 。2009—2010 年水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 含量由美国加利福尼亚大学戴维斯校区稳定同位素实验室采用液态水同位素分析仪 Laser Water Isotope Analyzer V2 测定,每个样品重复测定 6 次,前两次用以消除记忆效应,后 4 次测定的平均值作为水样同位素值。 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的仪器分析精度分别为 $\pm 0.8\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ 。所有水样测定结果以 VSMOW 为标准的千分差表示, δD (或 $\delta^{18}\text{O}$) = $[(R_{\text{sam}} - R_{\text{sta}}) / R_{\text{sta}}] \times 1000\text{‰}$ 。式中 R_{sam} 和 R_{sta} 分别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 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 的比率。

土壤湿度测定: 土壤湿度采用烘干法测定 $\rho \sim 1$ m 土层每 10 cm 间隔测定一次,1 m 以下土层每 20 cm 间隔测定一次。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 对文中数据进行统计分析,采用 SigmaPlot 10.0 和 Microsoft Excel 2003 制图。

2 结果与讨论

2.1 长武塬区降水稳定同位素特征

大气降水是陆地水循环的重要环节。对大气降水中环境同位素组成的研究,是应用同位素技术研究全球及局地水循环的必要前提。2005、2009 和 2010 年,研究区降水量分别为 527、500 和 576 mm,共收集降水水样 71 个,降水 δD 值在 $-142.0\text{‰} \sim -2.0\text{‰}$,平均值 \pm 标准差为 $-55.4\text{‰} \pm 33.6\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-19.6\text{‰} \sim -1.2\text{‰}$,平均值 \pm 标准差为 $-8.1\text{‰} \pm 4.4\text{‰}$ 。

根据降水水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的分析结果,获得长武塬区大气降水线方程(LMWL)为 $\delta\text{D} = 7.39\delta^{18}\text{O} + 4.34$ ($R^2 = 0.94$, $n = 71$) (图 2),与王锐等[21]报道的长武塬区降水线方程($\delta\text{D} = 7.44\delta^{18}\text{O} + 1.69$)略有差异。长武塬区大气降水线方程与全球大气降水线方程(GMWL) $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ [22] 及中国大气降水线方程 $\delta\text{D} = 7.74\delta^{18}\text{O} + 6.48$ [23] 相比,其斜率和截距均较小,表明降水在雨滴降落过程中经历了一定的蒸发分馏作用。这可能与研究区地理位置和气候条件有关。长武塬区地处中国大陆腹地,属半湿润易旱气候区,空气湿度低,因而雨滴降落过程中易受蒸发的影响。

由于同位素分馏作用,大气降水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值可能存在着温度、高度、季节和降水量等环境效应。通过 2009 年 11 月到 2010 年 10 月长武塬区日降水稳定同位素组成变化及相应的降水量(图 3)、2005 年和 2009 年 11 月到 2010 年 10 月(图 4)该区月降水稳定同位素组成的加权平均值变化可以看出,研究区降水同位素组成具有明显的季节变化,

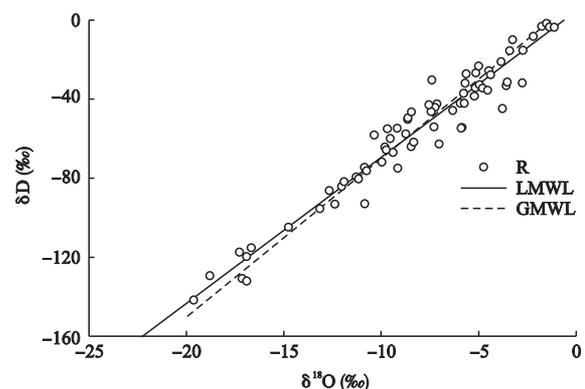


图 2 长武塬区大气降水线方程(LMWL)和全球大气降水线方程(GMWL)

Fig. 2 Equation of the local meteoric water line (LMWL) for the Changwu Tableland and the global meteoric water line (GMWL).

R: 雨水 Rainwater.

12月至次年6月降水中氢氧同位素值偏正,7—11月降水中氢氧同位素值偏负.这可能是由于黄土高原地区冬季由西风环流携带的大陆性气团控制,大陆性气团具有湿度低、蒸发强、降水量小的特性,因而降水中的氢氧同位素值相对较高;进入6、7月以后,东南季风开始抵达该区,由季风携带的海洋气团

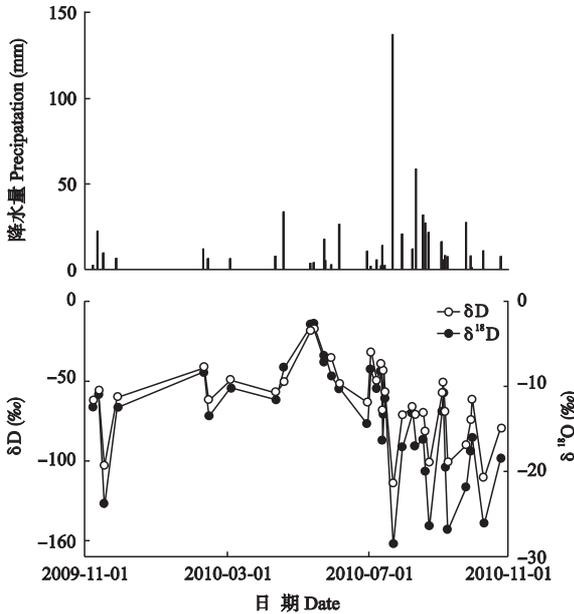


图3 长武塬区日降水稳定同位素组成的变化
Fig. 3 Variation of the isotope compositions in daily precipitation on the Changwu Tableland.
 P: 降水量 Precipitation.

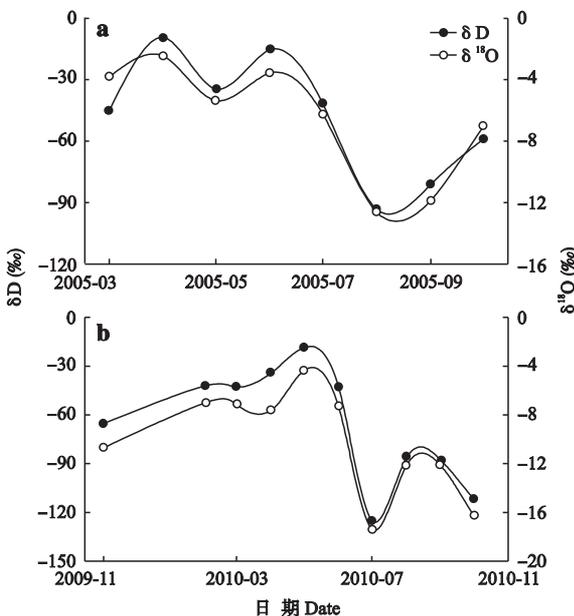


图4 长武塬区月降水稳定同位素的组成变化
Fig. 4 Variation of the isotopic compositions in monthly precipitation on the Changwu Tableland.
 a) 2005-03—2005-10; b) 2009-11—2010-10.

具有湿度大、蒸发弱、降水量大的特点,因而降水中的氢氧同位素值相对较低^[24].除季节变化明显外,研究区降水同位素组成也表现出一定的雨量效应,大的降水事件(如2010年7月24日)或持续时间较长的降水事件(如2010年9月9日)所采集的水样中,重同位素组成都明显偏负(图3).长武塬区降水同位素组成的变化特征,为利用氢氧同位素技术进一步研究该区水分转换关系提供了保障.

2.2 长武塬区土壤水稳定同位素特征

2.2.1 总体特征 对不同土地利用方式下提取的169个土壤水样品进行稳定同位素测定分析,其δD与δ¹⁸O的关系式为: $\delta D = 5.76\delta^{18}O - 19.86$ ($R^2 = 0.80, n = 169$). δD和δ¹⁸O的变化范围分别为-126.5‰ ~ -46.7‰和-16.6‰ ~ -4.3‰,平均值±标准差分别为-75.1‰ ± 10.9‰和-9.6‰ ± 1.7‰.

由图5可以看出,研究区大部分土壤水同位素值落于当地大气降水线之下,表明研究区在降水补给土壤水分过程中,蒸发作用使土壤水中的D和¹⁸O富集.然而,该区大气降水的δD和δ¹⁸O平均值分别为-55.4‰和-8.1‰,明显高于土壤水的δD和δ¹⁸O平均值.造成此种现象的原因在于黄土高原的气候特征和降水稳定同位素值的季节变化.长武塬区年均降水量为578 mm,且降水年内分布不均,55%以上的降水量集中在7—9月,同时降水稳定同位素组成具有明显的季节变化,冬春高、夏秋低.通过对比土壤水稳定同位素值与各月降水数据(图4)可知,土壤水δD和δ¹⁸O平均值明显低于12月到次年6月降水同位素值,但高于7—10月降水同位素值,表明黄土塬区土壤水分的恢复期主要在夏末和秋季,春季和冬季降水对土壤水分恢复的贡献不大.

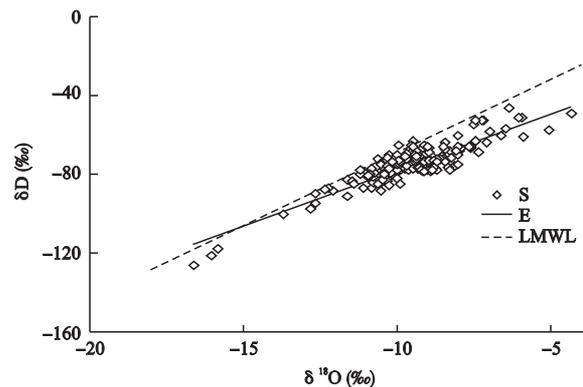


图5 研究区土壤水中δD与δ¹⁸O的关系
Fig. 5 Relationship between δD and δ¹⁸O in soil water in the study area.
 S: 土壤水 Soil water; E: 蒸发趋势线 The evaporation trend line; LMWL: 研究区大气降水线方程 Local meteoric water line in the study area.

2.2.2 土壤水同位素剖面 由图 6 可以看出,尽管土壤水同位素剖面受土地利用、降水入渗和蒸发等条件影响处于变化当中,但研究区土壤水同位素剖面分布具有如下特征: 1) 不同土地利用方式之间,土壤水同位素值在上部土层差异较大,随土壤深度增加土壤水同位素值趋于一致; 2) 相同土地利用方式下,上部土层土壤水同位素值随时间变化剧烈,随深度增加,土壤水同位素值随时间推移的变化减弱,甚至无变化.

黄土区降水年渗深决定于雨季降水量、同期土壤总蒸发量和雨季前土壤水分亏缺度^[25]. 不同土地利用方式之间土壤湿度和蒸发量的差异造成了降水补给深度的不同,由此导致不同利用方式之间上层土壤水稳定同位素值差异较大; 不同利用方式之间深层土壤水稳定同位素值趋于一致,表明了深层土壤水分来源于相同降水的补给. 然而,由于该区蒸发量远大于降水量,通常情况下,人工林草和高产农田的降水垂直入渗很难补给到 5 m 以下的深层土壤水分,只有在较大的丰水年才可能补给到 5 m 以下^[26]. 相同土地利用条件下土壤水同位素剖面的变化特征由如下原因造成: 浅层土壤水分易受降水混合和蒸发影响,其同位素组成变化较大; 深层土壤水分接受降水补偿有限,且降水与土壤水混合均匀,因此其同位素组成变化较小.

2.3 土壤水运动

2.3.1 蒸发与混合 土壤水分蒸发是引起土壤水同

位素分馏效应的最重要水文过程^[4 27-28],但土壤水分蒸发随土层深度的增加而迅速减小,受蒸发率、土壤类型、降水间隔时间等因素的影响^[29],能够引起土壤水同位素分馏的深度通常只有 0.5 ~ 3 m^[30]. 在蒸发条件下,当黄土高原地区土壤水分含量高于毛管断裂湿度时,土壤水分向蒸发面运移以液态水为主,但当土壤水分含量低于毛管断裂湿度时,土壤水分运移方式则以气态方式为主^[31]. 夏季到来之前,浅层土壤水分因受蒸发、蒸腾作用,含水量多低于毛管断裂湿度(图 7),因而土壤水分蒸发以气态运移为主. 通过对比 2009 年 10 月底与 2010 年 4 月 30 日不同土地利用条件下土壤水分稳定同位素组成(图 6)可以看出,荒草地、麦地和苹果林地分别在 1、1.5 和 2 m 以上土层出现不同程度的重同位素富集,表明了黄土塬区土壤物理蒸发在春季所能影响的深度. 进入秋季后,浅层土壤水分因接受夏季降水补给,含水量多已达到或接近田间持水量(图 7),土壤水分蒸发主要在蒸发面上进行,2010 年 11 月 2 日 3 种土地利用条件下土壤水重同位素在 30 cm 土层的富集说明了这一点(图 6).

除蒸发作用外,接受降水补给是土壤水分同位素值发生变化的另一个重要因素. 以荒草地 2010 年 4 月 30 日同位素剖面为例,2010 年 4 月 21 日降水 33.7 mm (δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -30.5‰ 和 -7.4‰) 至 2010 年 4 月 30 日,该场降水在荒草地已入渗至 0.4 m(图 7),由于水分入渗过程中的蒸发作用,该

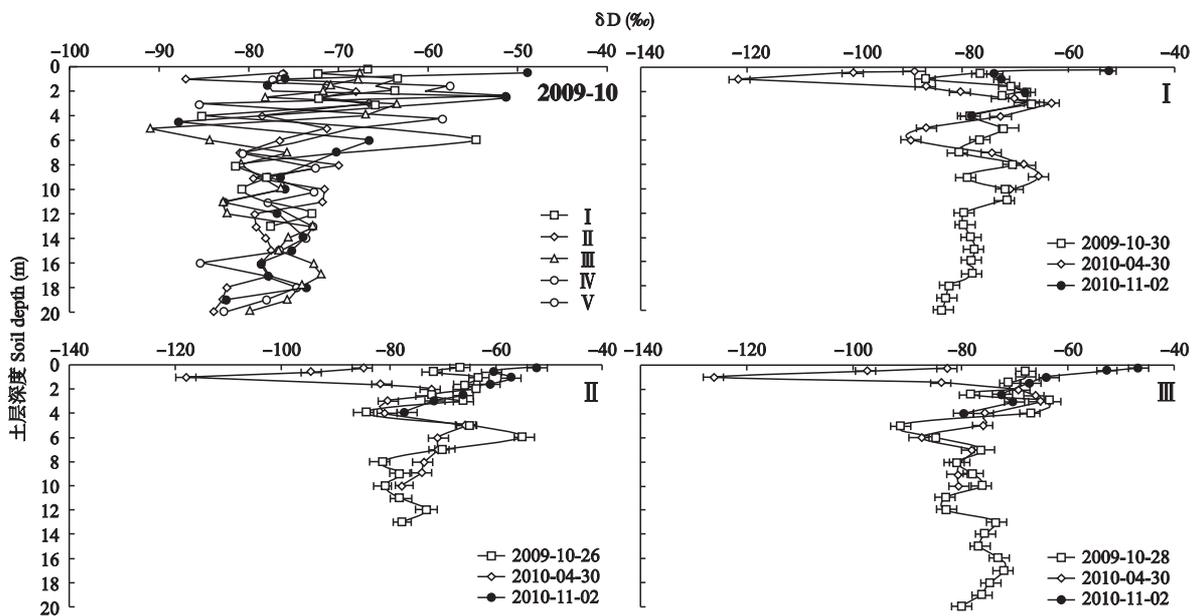


图 6 研究区土壤水 δD 值剖面
Fig. 6 Profiles of δD -values in soil water in the study area.

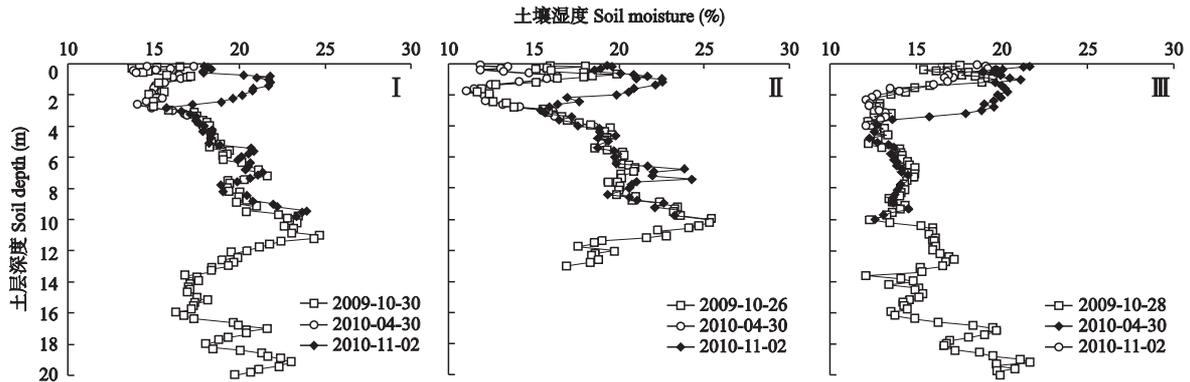


图7 荒草地、连作麦地和苹果园的土壤水分动态

Fig.7 Dynamics of soil water in nature grassland, monocultural winter wheat and apple orchard.

场降水到达 0.3 m 时 δD 和 $\delta^{18}O$ 值将大于 -30.5‰ 和 -7.4‰ ; 然而 2010 年 4 月 30 日采集到的 0.3 m 土层土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -52.5‰ 和 -7.2‰ , 表明 0.3 m 土层“旧水”已与降水发生混合, 导致了该层土壤水同位素值的富集. 麦地、果园 2010 年 4 月 30 日同位素剖面同样说明了混合作用引起了 0.3 m 土层土壤水同位素值的升高.

对比 2010 年 11 月和 2009 年 10 月不同土地利用条件下土壤水分稳定同位素组成(图 6) 可以看出, 荒草地的土壤水稳定同位素分别在 0~2 m、5~6 m 和 9 m 附近土层发生明显变化, 麦地在 0~2 m 和 6~8 m 土层发生明显变化, 苹果林地仅在 2.5 m 以上土层发生明显变化. 浅层土壤水分同位素值的变化受蒸发和混合作用共同影响, 而深层土壤水同位素值的改变仅由混合作用引起, 因而通过对比降水和土壤水稳定同位素组成变化可以获得土壤水分运动机制的有效信息^[6-7, 9].

2.3.2 活塞流与优先流 理解降水入渗机理对于研究降水补给地下水至关重要. 通过对比土壤水和降水同位素变化特征, Mathieu 和 Bariac^[9] 认为, 降水入渗存在 2 个过程: 一是降水通过土壤基质入渗后, 与浅层自由水完全混合, 并因蒸发而富集重同位素; 二是降水通过土壤大孔隙以优先流的形式快速通过浅层土层形成深层渗漏; Gazis 和 Feng^[6] 指出, 在土壤浅层, 入渗降水以活塞流形式下渗, 同时, 部分雨水能够以优先流的形式快速抵达深层土壤.

土壤水同位素值随土壤深度所发生的突变说明了降水入渗具有自上而下活塞式下渗的特征^[6], 即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. 以麦地为例, 2010 年 11 月麦地 0~2 m 土壤水同位素剖面(图 6) 与采样前降水稳定同位素组成变化(不考虑降水量 < 5 mm 的降水) 具有一定相

似性(图 3), 尤其是 1 m 深处土壤水(δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -118.2‰ 和 -15.8‰) 更是保留了 2010 年 8 月 24 日降水(降水量为 21.6 mm, δD 和 $\delta^{18}O$ 值分别为 -131.2‰ 和 -17.1‰) 的稳定同位素组成特征, 说明了活塞流下渗的发生. 荒草地和苹果林地浅层土壤水同位素值剖面变化(图 6) 与麦地相似, 同样证实了降水入渗具有活塞流入渗的特征.

荒草地和麦地深层土壤水同位素值的变化证明了降水入渗过程中存在着优先流形式的下渗. 截至 2010 年 11 月初, 荒草地和麦地降水湿润锋均至 3 m 左右(图 7), 而荒草地土壤水稳定同位素却在 5~6 m 和 9 m 附近土层发生明显变化, 麦地在 6~8 m 土层发生明显变化(图 6), 因蒸发影响深度有限, 因此能够引起深层土壤水分同位素组成改变的只有混合作用, 即以优先流形式快速到达此深度的降水补给. 土壤水同位素组成发生改变的深层土壤水分含量也明显增大, 同样证明了优先流的存在. Germann 等^[32] 认为, 大孔隙优先流是土壤深层水分可能来源的唯一通道. 黄土区土壤由于植物根系作用、动物入侵等原因具备形成大孔隙条件^[33-34], 开挖土壤剖面观测到, 长武塬区 2~10 m 土层中仍可见植物根孔和蚯蚓活动的大孔隙^[19], 黄土层内发育的黄土裂隙^[35] 也为优先流的发生提供了必要的路径. 然而, 高耗水型人工林草所形成的土壤干层^[25] 可能会阻止优先流的发生, 这是因为干层土壤干燥, 即使形成了优先流, 也会由于水势梯度差, 在干燥土层迅速被周围土体吸收. 果园深层土壤水稳定同位素值基本无变化便证明了这一点(图 6).

综上, 在黄土塬区, 降水入渗具有自上而下活塞式下渗的特征, 同时, 部分雨水可能通过一些“快速通道”以优先流的方式快速到达深层土壤, 从而对深层土壤水分或地下水形成补给. 然而, 这种优先补

给方式在空间上并不一定普遍发生,与土地利用方式有一定关系。通常情况下,高耗水型人工林草地(如苹果林地、苜蓿草地)因水分负平衡所形成的深厚土壤干层将会减弱这种优先补给发生的可能性;在适当的降水条件下,农田、荒草地等土地利用方式下深层土壤水分或地下水的优先补给方式均易发生。

3 结 论

长武塬区大气降水线方程为 $\delta D = 7.39\delta^{18}O + 4.34$ ($R^2 = 0.94$, $n = 71$)。受地理位置和气候条件的影响,研究区降水稳定同位素组成具有冬春高、夏秋低的季节变化特征,降水量较大或持续时间较长的降水事件的雨量效应显著,降水同位素值明显偏负。

土壤水稳定同位素值落于当地大气降水线下侧,普遍高于7—10月降水同位素值,表现出较强的同位素分馏作用,表明该区土壤水分主要接受同位素值偏负的夏秋季降水补给,而同位素值偏正的冬春季降水对土壤水分恢复的意义不大。不同土地利用方式之间,浅层土壤水同位素值差异较大,随土层深度增加,土壤水同位素值趋于一致;相同土地利用方式下,浅层土壤水因受蒸发和降水混合的共同影响,其同位素值的时间变化剧烈,而深层土壤水分仅接受有限降水补偿,且降水与土壤水混合均匀,因而深层土壤水同位素值随时间推移而变化的程度有所减弱,甚至无变化。

在黄土塬区,降水入渗具有自上而下活塞式下渗的特征,同时,部分雨水可能通过一些“快速通道”以优先流的方式快速到达深层土壤。通常情况下,活塞流式的稳定入渗发生于降水湿润锋以上土层,大孔隙优先流则是深层土壤水分恢复的主要方式。但这种优先补给方式的发生与土地利用方式有一定关系,在苹果林地、苜蓿草地等土地利用方式下,土壤水分负平衡所形成的深厚土壤干层将减小优先流发生的可能性;而在荒草地、农田等土地利用方式下,因土壤湿度较大,在适当的降水条件下均有可能发生优先流形式的降水入渗,从而对深层土壤水分或地下水形成补给。

参考文献

[1] Li Y-S (李玉山). Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journey of Natural Resources* (自然资源学报), 2001, **16**(5): 427–432 (in Chinese)

[2] Zimmermann U, Munnich KO, Roether W. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen

isotopes. *Geophysical Monograph Series*, 1967, **11**: 28–36

[3] Zimmermann U, Munnich KO, Roether W, et al. Tracers determine movement of soil moisture and evapotranspiration. *Science*, 1966, **152**: 346–347

[4] Barnes CJ, Allison GB. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils. 1. Theory. *Journal of Hydrology*, 1983, **60**: 141–156

[5] Hsieh J, Chadwick OA, Kelly EF, et al. Oxygen isotopic composition of soil water: Quantifying evaporation and transpiration. *Geoderma*, 1998, **82**: 269–293

[6] Gazis C, Feng XH. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, 2004, **119**: 97–111

[7] Song XF, Wang SQ, Xiao GQ, 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. *Hydrological Processes*, 2009, **23**: 1376–1388

[8] Brooks JR, Barnard HR, Coulombe R, et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geoscience*, 2010, **3**: 100–104

[9] Mathieu R, Bariac T. An isotopic study (2H and ^{18}O) of water movements in clayey soils under a semiarid climate. *Water Resource Research*, 1996, **32**: 779–789

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

[11] Xu S-G (许士国), Liu Y-F (刘盈斐), Sun W-G (孙万光). Research on the stable isotope for soil water vertical transporting in unsaturated zone of Zhalong wetland. *Journal of China Hydrology* (水文), 2006, **26**(5): 1–6 (in Chinese)

[12] Song XF, Wang P, Yu JJ, et al. Relationships between precipitation, soil water and groundwater at Chongling catchment with the typical vegetation cover in the Taihang mountainous region, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**: 787–796

[13] Hou S-B (侯士彬), Song X-F (宋献方), Yu J-J (于静洁), et al. Stable isotopes characters in the process of precipitation and infiltration in Taihang Mountainous region. *Resources Science* (资源科学), 2008, **30**(1): 86–92 (in Chinese)

[14] Wang S-Q (王仕琴), Song X-F (宋献方), Xiao G-Q (肖国强), et al. Applianse of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2009, **20**(4): 495–501 (in Chinese)

[15] Tian R-C (田日昌), Chen H-S (陈洪松), Song X-F (宋献方), et al. Characteristics of soil water movement using stable isotopes in red soil hilly region of northwest Hunan. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(9): 2747–2754 (in Chinese)

[16] Li J-Z (李嘉竹), Liu X-Z (刘贤赵). Advances of

- stable hydrogen and oxygen isotope applied in SPAC water cycle. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2008, **28**(4): 787–794 (in Chinese)
- [17] Wang R (王锐). Hydrological Transfer of Precipitation, Soil Water and Groundwater Based on Environmental Isotopes on the Loess Tableland. PhD Thesis. Yanling, Shaanxi: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, 2007 (in Chinese)
- [18] Xu X-X (徐学选), Zhang B-Y (张北赢), Tian J-L (田均良). Experimental study on the precipitation-soil water-groundwater transformation in loess hilly region. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2010, **21**(1): 16–22 (in Chinese)
- [19] Wang R (王锐), Liu W-Z (刘文兆), Li Z (李志). Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in loess tableland. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(3): 550–554 (in Chinese)
- [20] Wang T (王涛), Bao W-M (包为民), Chen X (陈翔), et al. Soil water extraction using vacuum distillation technology. *Journal of Hohai University* (Natural Sciences) (河海大学学报·自然科学版), 2009, **37**(6): 660–664 (in Chinese)
- [21] Wang R (王锐), Liu W-Z (刘文兆), Song X-F (宋献方). Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in precipitation on Changwu tableland. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(3): 56–59 (in Chinese)
- [22] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, **133**: 1702–1703
- [23] Liu J-D (刘进达), Zhao Y-C (赵迎春), Liu E-K (刘恩凯), et al. Discussion of the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation. *Site Investigation Science and Technology* (勘察科学技术), 1997(3): 34–39 (in Chinese)
- [24] Zhang X-P (章新平), Yao T-D (姚檀栋). Distributional features of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1998, **53**(4): 70–78 (in Chinese)
- [25] Li Y-S (李玉山). The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1983, **3**(2): 91–101 (in Chinese)
- [26] Liu WZ, Zhang XC, Dang TH, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 1133–1138
- [27] Allison GB, Barnes CJ, Hughes MW. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soil 2. Experimental. *Journal of Hydrology*, 1983, **64**: 377–397
- [28] Barnes CJ, Allison GB. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils. 3. Theory for non-isothermal water-movement. *Journal of Hydrology*, 1984, **74**: 119–135
- [29] Barnes CJ, Allison GB. Water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Journal of Hydrology*, 1988, **100**: 143–176
- [30] DePaolo DJ, Conrad ME, Maher K, et al. Evaporation effects on oxygen and hydrogen isotopes in deep vadose zone pore fluids at Hanford, Washington. *Vadose Zone Journal*, 2004, **3**: 220–232
- [31] Yang W-Z (杨文治), Shao M-A (邵明安). Research on Soil Moisture on the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [32] Germann P, Edwards WM, Owens LM. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropore. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, **48**: 237–244
- [33] Shi H (石辉), Liu S-R (刘世荣). The macroporosity properties of forest soil and its eco-hydrological significance. *Journal of Mountain Research* (山地学报), 2005, **23**(5): 533–539 (in Chinese)
- [34] Shi Z-J (时忠杰), Wang Y-H (王彦辉), Xu L-H (徐丽宏), et al. Soil macropore characteristics under typical vegetations in Liupan Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(12): 2675–2680 (in Chinese)
- [35] Xue G-L (薛根良). The mechanism of recharge and occurrence of the groundwater in loess areas. *Hydrogeology & Engineering Geology* (水文地质工程地质), 1995(1): 39–40 (in Chinese)

作者简介 程立平 男, 1981 年生, 博士研究生. 主要从事农业生态水文研究. E-mail: lpchengnwu@163.com

责任编辑 杨弘