

# 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律

孙晓旭<sup>1</sup>, 陈建生<sup>2</sup>, 史公勋<sup>3</sup>, 谭红兵<sup>2</sup>, 刘晓艳<sup>2</sup>, 苏治国<sup>2</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 2. 河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098;  
3. 中建八局第三建设有限公司, 210046)

**摘要:** 为了研究土壤水蒸发与降水入渗非饱和带过程中不同水体氢氧同位素的变化规律, 该文选用 2 种不同性质的土壤-砂土和黄土, 设计了土壤水蒸发和降水入渗室内试验。结果表明: 对于砂土, 土壤水蒸发过程中剩余水体氢氧同位素分馏遵从瑞利模式; 对于黄土, 随着蒸发时间的延长, 剩余土壤水氢氧同位素值越来越远离瑞利分馏关系线; 在降水入渗非饱和带的初期, 相对于风干砂土, 风干的黄土颗粒对土柱出流水的氢氧同位素值产生了影响, 并且出流水的氢氧同位素亦受到土壤原水同位素值的影响, 只有入渗的降水达到了一定数量, 土柱出流水才能与降水的同位素值相同。该研究可为运用氢氧同位素研究降水能否通过非饱和带补给地下水提供数据分析的依据。

**关键词:** 同位素, 土壤水, 蒸发, 入渗, 氢, 氧, 瑞利分馏

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.016

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0100-06

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.

Sun Xiaoxu, Chen Jiansheng, Shi Gongxun, et al. Hydrogen and oxygen isotopic variations of different water bodies in evaporation and rainfall infiltration processes[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 100-105. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

土壤水分受降水入渗补给、蒸发蒸腾等作用的影响, 处于不断变化的状态, 氢氧同位素可作为天然的示踪剂来追踪水在土壤中的运动过程, 根据土壤水中氢氧同位素的变化特征可以提供有关水在土壤中的运移信息<sup>[1]</sup>。对于氢氧同位素随剖面深度的变化规律前人己做过大量研究。在测定土壤水同位素之前首先涉及到的是土壤水分的提取问题, 荆继红等<sup>[2]</sup>通过试验总结了土壤水取样器在 4 种不同岩性中的土壤水提取量与土壤含水量的关系; 王涛等<sup>[3]</sup>介绍了共沸蒸馏、真空蒸馏、离心分离、锌的微量蒸馏 4 种土壤水提取技术, 并对其优缺点进行了比较; 1995 年, Shurbaji 等<sup>[4]</sup>设计了土柱试验, 研究土壤剖面蒸发第二阶段的特征及同位素和温度湿度之间的关系。包为民等<sup>[5]</sup>研究了降水入渗条件下土壤水同位素的变化, 但只是针对一种性质的土壤, 实际上土壤水分蒸发和降水入渗过程与土壤颗粒的性质有关<sup>[6-8]</sup>。对于野外研究, Gazis 等<sup>[9]</sup>对比分析了汉诺威 6 个地区降水和不同深度土壤水中的  $\delta^{18}\text{O}$  值, 成功的区分了土壤中的静水与动水。Kwang-Sik 等<sup>[10]</sup>研究了韩国济州岛 1 年之中降水和 3 个不同深度土壤水的氢氧同位素值, 分析得出土壤水接受年降水的补给, 蒸发的影响可以忽略。宋献方等<sup>[11]</sup>研究了太行山区土壤剖面环境

氧同位素的分布规律, 并根据土壤水和地下水的环境同位素值估算出了土壤水入渗补给地下水的补给量。王仕琴等<sup>[12]</sup>、徐学选等<sup>[13]</sup>通过对比分析降水、土壤水和地下水中的氢氧同位素特征, 研究了不同地区降水-土壤水-地下水之间的转化关系。

可以看出以上研究主要偏重于水体同位素值的直接应用方面, 对土壤水蒸发和降水入渗非饱和带过程中不同水体同位素值是如何变化的、变化机理等研究较少, 本文通过设计室内试验来研究不同性质的土壤在经历蒸发和降水入渗过程中各种水体氢氧同位素的变化规律。

## 1 材料与方法

试验采用了砂土和黄土, 土样取回后风干 48 h, 其颗粒组成如图 1 所示。于 2009 年 8 月 24-30 日, 在河海大学水文水资源国家重点实验室进行有关试验, 样品氢氧同位素测试在稳定同位素气体质谱仪 Thermo-MAT253 上完成, 氢同位素值 ( $\delta\text{D}$ ) 和氧同位素值 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) 的测量精度分别为  $\pm 2\%$  和  $0.2\%$ 。

### 1.1 土壤水蒸发试验

平衡条件下土壤水(砂土)蒸发过程中同位素分馏遵从瑞利模式<sup>[14]</sup>, 由于条件限制, 蒸发后剩余水体的同位素值未能直接测得, 并且只研究了砂土。因此, 克服上述研究的不足, 我们补充设计了下面的土壤水蒸发试验。共设计了 4 组, 2 组为砂土, 2 组为黄土。风干后的土样加入已知同位素组成 ( $-69.1\%$ ,  $-9.06\%$ ) 的水分, 混合均匀, 样品密封静置 24 h 后用于土壤水蒸发试验。

收稿日期: 2011-05-05 修订日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(项目编号 50809024, 41073034)

作者简介: 孙晓旭(1983-), 女, 江苏徐州人, 博士生, 主要从事同位素水文学研究。南京 河海大学水利水电学院, 210098。

Email: 253740501@qq.com

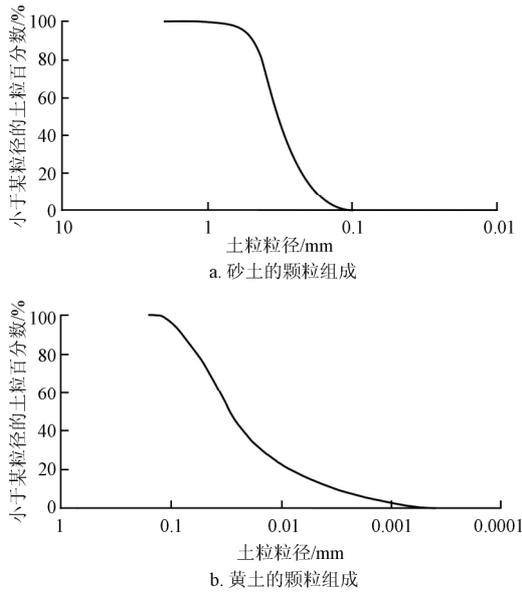
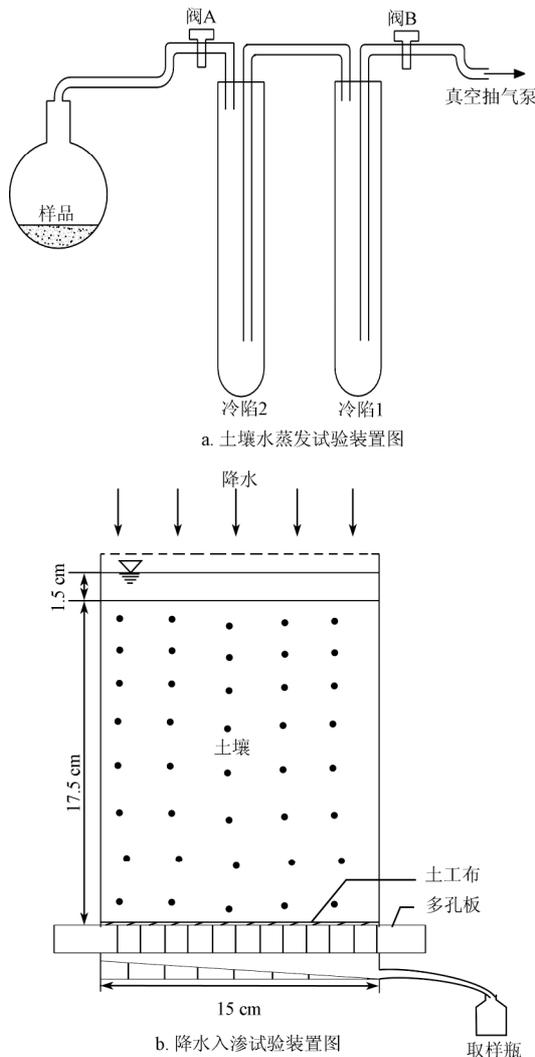


图 1 砂土和黄土的颗粒组成

Fig.1 Diagram of particle composition of sand and loess soil



注：倒三角符号表示水位，降水入渗试验中是积水入渗，积水层高 1.5 cm。

图 2 试验装置示意图

Fig.2 Diagram of experimental apparatus

土壤水蒸发试验装置示意图如图 2a 所示，每组样品分为 3 个蒸发阶段，用冷阱 1 收集常温下蒸发出的水蒸汽，剩余土壤水在 100℃ 条件下全部提取出来，用冷阱 2 收集。

1.2 降水入渗试验

试验土柱为高 20 cm，直径 15 cm 的透明有机玻璃，土柱底部有一多孔板，上面铺 1 层土工布过滤水流中的泥沙。填土高度 17.5 cm，土柱顶部降水（同位素组成已知），试验过程中维持土柱上方积水层高 1.5 cm。试验装置示意图如图 2b 所示。

共设计了 4 个柱子，分别记为柱 1、柱 2、柱 3、柱 4。柱 1 和柱 3 分别填充风干砂土和风干黄土；柱 2 和柱 4 分别填充具有一定含水率、相对于降水富集重同位素的砂土和黄土，分别测定土壤水的初始同位素组成。土柱填好后，上方降水，待底部出流后开始收集水分，柱 1 和柱 2 中每个土柱均收集 14 个样品，样品收集结束后，在柱 2 上层和下层各取得土样，样品只进行了氢同位素测试；柱 3 和柱 4 中每个土柱均收集 16 个出流水样品，样品均进行氢氧同位素分析。按照收集的先后顺序出流水样品采用 1#，2#，3#，4#.....等编号表示。

每组试验的基本参数如表 1 所示

表 1 土壤水蒸发试验基本参数

Table 1 Basic parameters in soil water evaporation experiment				
土壤类型	编号	含水率/%	土壤样品质量/g	常温下蒸发时间/min
砂土	第 1 组 S1,1	8.6	143.2	30
	S1,2	8.6	143.2	50
	S1,3	8.6	143.2	60
	第 2 组 S2,1	13.5	139.3	15
	S2,2	13.5	139.3	40
	S2,3	13.5	139.3	70
黄土	第 1 组 T1,1	13.2	125.5	15
	T1,2	13.2	125.5	45
	T1,3	13.2	125.5	75
	第 2 组 T2,1	15.4	101.4	30
	T2,2	15.4	101.4	60
	T2,3	15.4	101.4	90

2 结果与分析

2.1 蒸发过程中剩余水体氢氧同位素变化规律

瑞利分馏模型中，

$$\delta_1 = (\delta_0 + 1)f^{(\alpha^* - 1)} - 1 \quad (1)$$

式中， $\delta_0$  为水体初始同位素值， $f$  为剩余水体比例， $\alpha^*$  为氢氧同位素的分馏系数， $\delta_1$  为剩余水体的同位素值。

试验中，已知温度即可得到分馏系数的值，配制样品时加入水的同位素值已知，风干砂土含水率 (0.18%) 忽略不计，风干黄土含水率为 3.85%，其氢氧同位素值 (-81.4‰, -10.34‰) 与加入的水有显著差异，因此黄土中土壤水初始  $\delta_0$  值可能为吸湿水与加入水混合后的值。

根据同位素质量守恒定律算得  $\delta_0$  的值。土壤水（砂土）初始值  $\delta_0D$  和  $\delta_0^{18}O$  分别为  $-69.1\text{‰}$  和  $-9.06\text{‰}$ 。2 组黄土样品中的初始  $\delta_0$  值不同，第 1 组  $\delta_0D$  和  $\delta_0^{18}O$  分别为  $-72.7\text{‰}$  和  $-9.43\text{‰}$ ，第 2 组  $\delta_0D$  和  $\delta_0^{18}O$  分别为  $-72.2\text{‰}$  和  $-9.38\text{‰}$ ，平均值分别为  $-72.5\text{‰}$  和  $-9.41\text{‰}$ 。

Majoube 提出了温度  $T$  从 273.15 到 373.15 K 变化时分馏系数  $\alpha^*$  与  $T$  (K) 的关系<sup>[15]</sup>，试验时温度为 299.15K，得出  $\alpha^*D=0.9274$ ， $\alpha^*^{18}O=0.9908$ ，由式 (1) 得出的瑞利关系线、剩余水体氢氧同位素值与  $f$  的关系如图 3 所示，可以看出，对于砂土，数据点基本上沿着瑞利关系线 1 分布，说明土壤水蒸发过程中剩余水体氢氧同位素变化符合瑞利分馏规律。但是对于黄土，数据点不在任意一条瑞利关系线上，并且随着蒸发时间的延长，数据点偏离瑞利关系线就越多。说明蒸发初期，土壤含水率较大，水蒸汽从液态水中逸出基本不受土颗粒吸引力的影响，烧瓶中湿度接近于 1，但随着蒸发时间的延长，土壤含水率不断减少，蒸发的土壤水受土颗粒吸引力的影响逐渐明显，烧瓶中湿度降低。

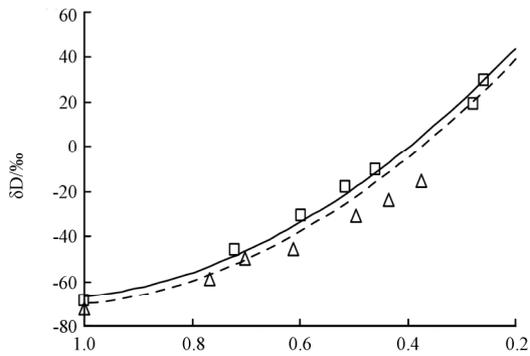


图 3a.  $\delta D$  与剩余水体比例  $f$  的关系

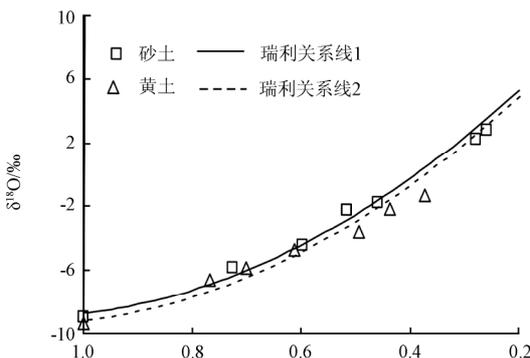


图 3b.  $\delta^{18}O$  与剩余水体比例  $f$  的关系

注：瑞利关系线 1 为  $\delta_0D$  和  $\delta_0^{18}O$  分别取为  $-69.1\text{‰}$  和  $-9.06\text{‰}$ ，瑞利关系线 2 为  $\delta_0D$  和  $\delta_0^{18}O$  分别取为  $-72.5\text{‰}$  和  $-9.41\text{‰}$

图 3 剩余水体  $\delta_0D$  和  $\delta_0^{18}O$  与剩余水体比例  $f$  的关系  
Fig 3 Relationship between  $\delta_0D$  ( $\delta_0^{18}O$ ) values and ratio ( $f$ ) of residual soil water

剩余水体氢氧同位素关系线如图 4 所示，可以看出，土壤（砂土）水蒸发线斜率为 7.9923，说明湿度接近于 1<sup>[16]</sup>，土壤水蒸发剩余水体同位素分馏遵循瑞利模式。黄土样品中，土壤水蒸发线斜率 (7.0934) 较砂土低，蒸发

过程中湿度低一些，土壤颗粒对水分子的吸引力对水分子蒸发产生了阻碍作用。图 5 为剩余水体和已蒸发水蒸气的氢氧同位素关系图，在水的蒸发富集过程中，水蒸汽将会出现相应的同位素亏损，且两者在同一条蒸发线上，但剩余水体和水蒸汽分布在初始同位素值的两边<sup>[16]</sup>。

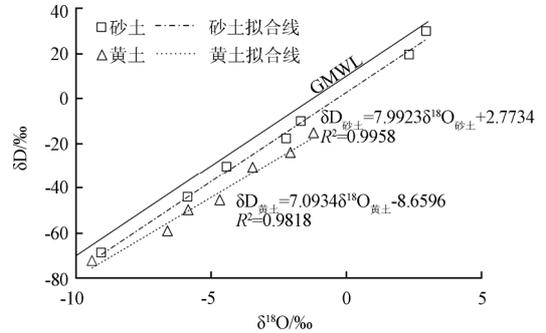


图 4 剩余水体  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  关系线  
Fig.4  $\delta D \sim \delta^{18}O$  plot of residual soil water

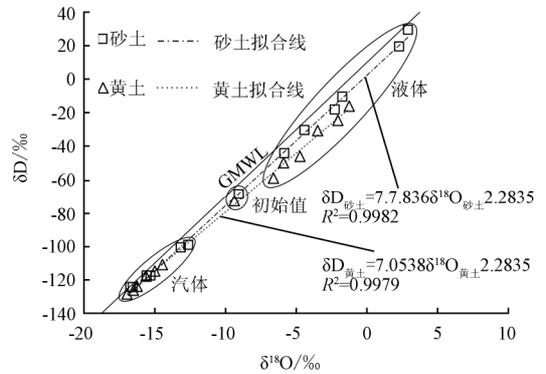


图 5 已蒸发水蒸汽与剩余水体的  $\delta_0D$  和  $\delta_0^{18}O$  关系图  
Fig.5  $\delta_0D \sim \delta_0^{18}O$  plot of evaporated water vapor and residual soil water

### 2.2 降水入渗过程中出流水氢氧同位素变化规律

试验时土柱上方降水的  $\delta D$  值为  $-69.5\text{‰}$ ，柱 1 中选择 5 个出流水样品进行氢同位素测试，测试结果在  $-68.5\text{‰} \sim -69.9\text{‰}$  之间变化，出流水样品与降水同位素值之间的偏差仅为  $0.5\text{‰}$ ，小于氢同位素的测试精度，因此可以看出水分在入渗的过程中没有产生同位素分馏。

柱 2 中土壤初始含水率为 7.9%，氢同位素组成为  $-54.7\text{‰}$ ，与试验时土柱上方降水同位素值 ( $-68.9\text{‰}$ ) 相比，初始土壤水明显富集重同位素。在出流水样品中，选择了 8 个进行氢同位素测试，氢同位素测试结果如图 6a 所示。可以看出，样品 1#氢同位素接近于初始土壤水，随着流出水量的增加，土壤水氢同位素值不断偏负，逐渐接近于土柱上方的降水。出流水样品中氢同位素的变化范围为  $-55.3\text{‰} \sim -63.6\text{‰}$ 。本试验中所取出流水样偏少，最后一个出流水样品 14#氢同位素值比降水偏正。但土柱上层的土壤水 ( $-69.1\text{‰}$ ) 已具有了和降水相同的同位素值，下层的土壤水同位素值介于 14#和降水之间。出流水的同位素值与收集水量的关系如图 6b 所示，两者呈很好的线性关系，随着收集水量的增加，同位素不断偏负，

按照拟合公式计算出当收集水量达到 343.89 ml 时，出流水的同位素值与降水的值相同，即土柱中的土壤水已全部被加入的降水取代。

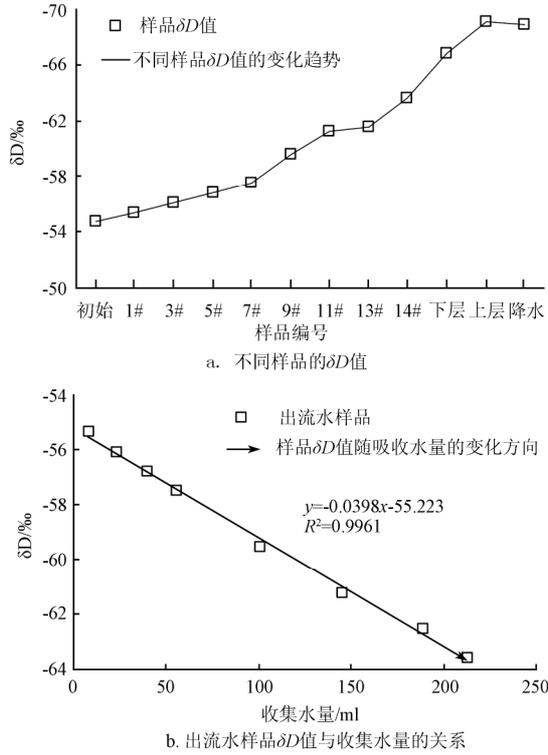


图 6 柱 2 中出流水、土壤水的  $\delta D$  分布与  $\delta D$  收集水量的关系  
Fig.6  $\delta D$  value of outflows and soil water in column,  $\delta D$  value of outflows and collected water amount in column 2

风干黄土含水率为 3.85%， $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值分别为 -81.4‰和-10.34‰，柱子 4 中初始土壤水为富集重同位素的水分 (ZFS,  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值分别为-47.6‰和-3.03‰) 与吸湿水的混合，柱 3 和柱 4 出流水样品氢氧同位素关系分别如图 7 和图 8 所示。

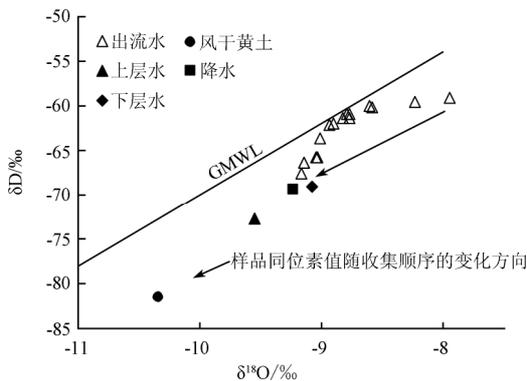
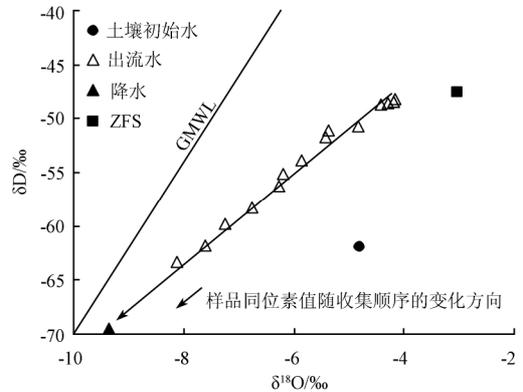


图 7 柱 3 中出流水氢氧同位素关系  
Fig.7  $\delta D \sim \delta^{18}O$  plot of outflows in column 3

图 7 中，风干黄土的氢氧同位素值明显比其余样品偏负。第一个出流水样品具有最正的同位素值，随着出流水量的增加，样品氢氧同位值呈曲线变化逐渐接近于降水 (图 7 中箭头方向)。出流水样品氢氧同位素的变

化范围分别为 -59.1‰~-67.5‰和-7.95‰~-9.16‰。风干黄土中仅含有土壤吸湿水，当土柱上方有降水入渗时，土壤颗粒分子仍可以吸附一定的水分子，形成薄膜水层，并引起入渗水分发生同位素分馏<sup>[17]</sup>。入渗初期，土柱顶部土壤薄膜水同位素值最负，自由水在土壤内部入渗的过程中轻同位素不断减少，因此到了土壤底部薄膜水的同位素值最正，出流水也富集重同位素，其后随着降水入渗量的增加，整个剖面中土壤薄膜水不断与其外面的水分进行同位素交换，直至达到同位素平衡，出流水和降水同位素相同。土柱上层的土壤水同位素值比降水偏负，位于降水和土壤吸湿水同位素值的连线上，显然所提取的土壤水是吸湿水和降水的混合，这也充分说明了上层土壤中的薄膜水与加入的水分达到了同位素平衡。下层土壤水没有在吸湿水和降水的连线上，比上层水偏正，这是因为入渗的水量少，下层土壤水还没有与自由水达到同位素平衡。



注：全球大气降水线 (Global meteorite water line, GMWL)，下同。  
图 8 柱 4 中出流水氢氧同位素关系

Fig 8  $\delta D \sim \delta^{18}O$  plot of outflows in column 4

图 8 中，柱 4 的第一个出流样品接近于 ZFS 的氢氧同位素值，而远离土壤初始水 (吸湿水和 ZFS 的混合)。随着收集水量的增加，出流水的同位素值呈线性变化，逐渐向降水的同位素值靠近。出流水样品氢氧同位素的变化范围分别为 -47.6‰~-63.4‰和-3.99‰~-8.12‰。由于收集水量不足，出流水中最后一个样品比加入水的氢氧同位素值偏正，氢氧同位素值两者相差分别为 6.09‰和 1.24‰。图 9 为柱 4 中出流水氢氧同位素值与累计收集水量的关系，根据氧的拟合关系线得出当收集总水量为 338 mL 时，出流水的氧同位素值与降水的相同，而根据氢同位素拟合关系线求出收集总水量应为 365 mL，由于拟合 2 条关系线时是有误差存在的，所以收集总水量的值存在差别，但可以看出，当收集水量大于 365 mL 时，土壤出流水与降水同位素值相同。

Richard 等<sup>[18]</sup>提出如果地下水是由降水通过非饱和带补给的，在降水没有入渗补给到地下水之前即降水在土壤里运移的过程中同位素没有受到影响，并且补给源仅限于降水的直接入渗，那么地下水将保留降水的同位素特征，通常认为蒸发是影响土壤中入渗水源同位素改变的主要过程。试验得出，降水在土壤中入渗的初期，

入渗透到下的水分受到土壤颗粒性质和土壤原水同位素值的影响,只有入渗水量达到了一定数量,入渗透到下的水分才能反应降水的同位素值。因此如果降水能够补给到地下水中,那么地下水的同位素值偏正于降水或者与降水相近,但不会偏负于大气降水。

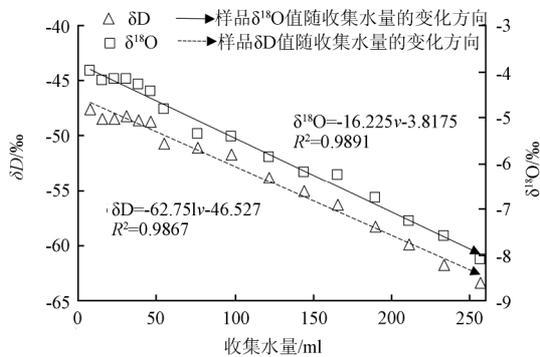


图9 柱4中出流水同位素值与收集水量的关系

Fig 9 Relationship of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values of outflows and collected water amount in column 4

### 3 结论

1) 平衡条件下,对于砂土,土壤水蒸发氢氧同位素遵循瑞利分馏规律,但是对于黄土,蒸发过程中随着剩余土壤含水率的减小,氢氧同位素数据点越来越远离瑞利分馏关系线。

2) 在降水入渗非饱和带的初期,相对于风干砂土,风干黄土颗粒对出流水同位素值产生了影响,并且出流水氢氧同位素亦受到土壤原水同位素值的影响。

3) 从黄土出流水的氢氧同位素演化趋势得出,只有入渗水量达到了一定数量,入渗透到下的水分才能反应降水的同位素值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 李晖,周宏飞. 稳定性同位素在干旱区生态水文过程中的应用特征及机理研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(6): 810—816.  
Li Hui, Zhou Hongfei. Application characteristics and mechanism of stable isotope techniques in the study of eco-hydrological progresses in arid regions[J]. Arid Land Geography, 2006, 29(6): 810—816. (in Chinese with English abstract)
- [2] 荆继红,韩双平. 土壤水取样技术应用基础研究[J]. 地球学报, 2001, 22(4): 380—383.  
Jing Jihong, Han Shuangping. Fundamental research on soil water sampling technology[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(4): 380—383. (in Chinese with English abstract).
- [3] 王涛,包为民,陈翔,等. 真空蒸馏技术提取土壤水实验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 660—664.  
Wang Tao, Bao Weimin, Chen Xiang, et al. Soil water extraction using vacuum distillation technology[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(6): 660—664.
- [4] Shurbaji A R M, Phillips F M, Campbell A R, et al. Application of a numerical model for simulating water flow, isotope transport, and heat transfer in the unsaturated zone[J]. Journal of Hydrology, 1995, 171(1/2): 143—163.
- [5] 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.  
Bao Weimin, Wang Tao, Hu Haiying, et al. Isotopic variations of soil water in rainfall infiltration experiment[J]. Acta Scientiarum Naturalium University Sunyatseni, 2009, 48(6): 132—137.
- [6] 原翠萍,张心平,雷廷武,等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 25—28.  
Yuan Cuiping, Zhang Xinping, Lei Tingwu, et al. Effects of mulching sand and gravel size on soil moisture evaporation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 25—28.
- [7] 宋日权,褚贵新,冶军,等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(Suppl.1): 109—114.  
Song Riquan, Chu Guixin, Ye Jun, et al. Effects of surface soil mixed with sand on water infiltration and evaporation in laboratory[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Suppl.1): 109—114. (in Chinese with English abstract)
- [8] 包含,侯立柱,刘江涛,等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 70—75.  
Bao Han, Hou Lizhu, Liu Jiangtao, et al. Experiment on process of soil water infiltration and redistribution under simulated rainfall[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 70—75. (in Chinese with English abstract)
- [9] Gazisa C, Feng X H. A stable isotope study of soil water: Evidence for mixing and preferential flow paths[J]. Geoderma, 2004, 119(1/2): 97—111.
- [10] Lee K S, Kim J M, Lee D R, et al. 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(3/4): 199—211.
- [11] 宋献方,李发东,刘昌明,等. 太行山区水循环及其对华北平原地下水的补给[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 398—408.  
Song Xianfang, Li Fadong, Liu Changming, et al. Water cycle in Taihang Mt and its recharge to groundwater in North China Plain[J]. Journal of natural resources, 2007, 22(3): 398—408. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.  
Wang Shiqin, Song Xianfang, Xiao Guoqiang, et al. Application of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advance in Water Science, 2009, 20(4): 495—501. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐学选,张北赢,田均良. 黄土丘陵区降水-土壤水-地下水转化实验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 16—22.  
Xu Xuexuan, Zhang Beiying, Tian Junliang. Experimental study on the precipitation-soil water-groundwater

- transformation in loess hilly region[J]. *Advance in Water Science*, 2010, 21(1): 16—22.
- [14] Sun Xiaoxu, Chen Jiansheng, Tan Hongbing, et al. Study on the mechanism of isotope fractionation in soil water during the evaporation process under equilibrium condition[J]. *Chin J Geochem*, 2009, 28(4): 351—357.
- [15] Majoube M. Fractionnement en oxygène-18 et en deuterium entre l'eau et sa vapeur[J]. *J Chim Phys*, 1971, 10: 1423—1436.
- [16] 张慧, 张新基. 水文地质学中的环境同位素[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006: 23—49.
- [17] Aragufis L, Rozanski K, Gonfiantini R, et al. Isotope effects accompanying vacuum extraction of soil water for stable isotope analyses[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 168(1/4): 159—171.
- [18] Taylor R G, Ken W, Howard F. Groundwater recharge in the Victoria Nile basin of east Africa: Support for the soil moisture balance approach using stable isotope tracers and flow modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 180(1/4): 31—53.

## Hydrogen and oxygen isotopic variations of different water bodies in evaporation and rainfall infiltration processes

Sun Xiaoxu<sup>1</sup>, Chen Jiansheng<sup>2</sup>, Shi Gongxun<sup>3</sup>, Tan Hongbing<sup>2</sup>, Liu Xiaoyan<sup>2</sup>, Su Zhiguo<sup>2</sup>

(1. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *The Third Construction Limited Company of China Construction Eighth Engineering Division, Nanjing 210046, China*)

**Abstract:** In order to study the isotopic variations of different water bodies in soil water evaporation and rainfall infiltration processes, two different soils—sand and loess were chosen and two indoor experiments were designed. The analysis of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values showed that the isotope fractionation of soil water obeyed the Rayleigh model in the process of water evaporation for sand. But for the loess, the isotopic compositions of the residual soil water were away from the Rayleigh line along with the increasing of evaporation time. In the early stage of rainfall infiltration, the isotopes of outflows were affected by the air dry loess grain, which was different from the air dry sand. And the values of outflows were also affected by isotopes of the initial soil water. Only when the infiltration amount reached a certain one, the outflow could represent the isotopic composition of rainfall. The results of this study can provide data analysis basis of relationship between local rainfall and groundwater based on isotopic variations.

**Key words:** isotopes, soil moisture, evaporation, infiltration, hydrogen, oxygen, Rayleigh fractionation