

青藏高原中部土壤水中稳定同位素变化*

田立德¹ 姚檀栋¹ M. TSUJIMURA² 孙维贞¹

(1 中国科学院寒区与旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境实验室, 甘肃兰州 730000;

2 Institute of Geoscience, Tsukuba University, Japan)

摘要 根据 1998 年夏季测得的青藏高原中部那曲地区降水和土壤水中稳定同位素, 分析了不同层位土壤剖面中稳定同位素的变化规律及与水分迁移的关系。研究发现, 土壤表层水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的直接影响, 并且与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 有相同的变化趋势, 而地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的直接影响不明显, 变化幅度很小, 表明地下水并非直接来源于当年夏季的降水, 可能代表了多年降水的平均状态。不同土壤剖面水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化反映了降水向地下逐渐渗浸的过程。表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水的影响最为明显, 而向下土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响增强, 显示出地下水在土壤水分活动中起着活跃的作用。

关键词 土壤, 稳定同位素, 水分迁移, 青藏高原中部

中图分类号 S152.7

对于水循环过程中稳定同位素变化的认识, 以前主要倾向于降水过程, 而降水只是水循环过程中的一个环节。其实, 水的蒸发、河水和湖水以及土壤水和地下水在稳定同位素水文循环中都具有重要的位置, 尤其是土壤水和地下水, 在调节稳定同位素的季节变化, 维持一个地区水中稳定同位素平衡中起着重要作用。

土壤水中的稳定同位素变化受大气降水中稳定同位素以及地表蒸发, 水分在土壤中的水平迁移和垂直运动等多种因素的影响。因此水中稳定同位素又可以作为一种天然的示踪剂来追踪水在土壤中的输送过程。利用土壤水中稳定同位素的变化可以提供有关水在土壤中迁移的信息。国际原子能机构和世界气象组织 (IAEA/WMO) 早就倡导用稳定同位素方法来管理水资源^[1], 而且在此之前已开始利用稳定同位素来研究地下水的移动^[2,3], 并对从降水到地下水的过程中稳定同位素的变化进行了评估^[4]。虽然目前对于青藏高原降水和地表水中稳定同位素的变化特征有了一定的了解^[5,6], 但对于作为水循环的一个重要部分——土壤水中的稳定同位素变化以及其在稳定同位素水文循环中所起的作用还知之甚少。在 1998 年夏季, 我们在青藏高原中部那曲地区进行了水循环过程中的稳定同位素研究。土壤中的稳定同位素变化作为稳定同位素循环的一个过程也包括其中。

* 国家基础研究发展规划(G19988040802), 国家自然科学基金(49801004), 中国科学院重点项目 (KJ-b-2-205) 和日本 GAME/Tibet 项目资助

收稿日期: 2000-07-17; 收到修改稿日期: 2000-12-7

1 材料与方法

实验地点是那曲南部 20km 处较平坦地,土壤为次生风化土,土壤表层为稀疏草地。该处地下水深度在 100cm 左右。土壤剖面组成列在表 1 中。

表 1 实验地点土壤剖面物理结构

Table 1 Physical construction of the soil profile in the research area

土壤深度 Soil depth(cm)	土壤组成 Soil construction
0~ 10	次生土壤层,含腐殖质
10~ 30	泥沙质
30~ 40	细砂质
40~ 45	薄黏土层
45~ 100	松软砂质土,夹碎小石

在野外使用了两种方法进行土壤水样的收集:一种方法是用手动低真空装置抽取土壤不同深度层的土壤水,这种方法要求土壤中水分含量相对较高^[7]。每天抽取 10cm, 20cm, 30cm, 50cm, 70cm, 100cm 6 个不同深度土壤水水样。另一种方法是野外收集土壤样(地表土样和土壤剖面土样)并密封好,然后在实验室内用蒸发冷却的方法来提取土壤中的水分。每天早晨 10 00 采集土壤表层 0~ 5cm 的样品。同时,将一塑料瓶埋于土壤中,其上置一漏斗用于收集每天的降水样,收集降水样的时间为早晨 10 00。

降水样以及蒸馏提取的水样的氧稳定同位素测定是在中科院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境实验室用 MAT-252 气体质谱仪完成的。手动低真空装置测得的抽取的不同土壤深度水样中的氧稳定同位素是在日本京都大学生态研究中心用 MAT-252 气体质谱仪测试完成的。测得的降水样中氧稳定同位素的含量为与“标准平均大洋水(SMOW)”的千分差,表示为:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{样品}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}}$$

其中 $R_{\text{样品}}$ 为水样样品中 ^{18}O 的浓度,而 R_{SMOW} 为 SMOW 中 ^{18}O 的浓度。测得的 $\delta^{18}\text{O}$ 的精度为 0.2‰。

2 结果与讨论

2.1 地表层土壤水中稳定同位素的变化

测量表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的一个主要目的是研究地表土壤蒸发对土壤表层水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响。由于观测期间每天都有降水发生,因此很难从中分辨出地表蒸发对土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响。图 1 给出了表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的日变化和当地日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化。可以看出,虽然表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动幅度小于降水,但表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化表现出与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化一致的趋势,显示出表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 控制。但从 8 月 24 日开始,降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 偏离土壤水样中 $\delta^{18}\text{O}$,从降水量变化来看(图 2),8 月 24 日降水量较大,而在以后的数天内,降水量较小,所以土壤水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 在此后数天内主要受 8 月 24 日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 影响。

但表层土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度小于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化。这是由于当降水进入土壤时,土壤中的水分并没有完全被替换掉,土壤中有一部分水与土壤或植被被根系结合紧密。

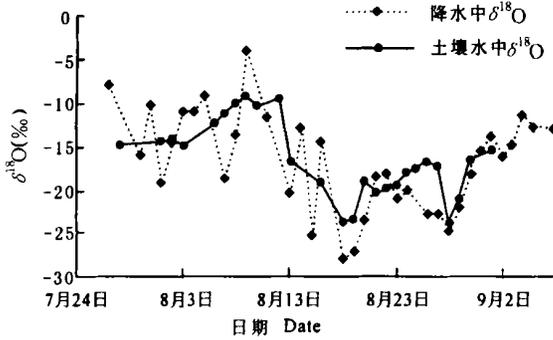


图 1 1998 年夏季青藏高原中部那曲表层土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 与当地日降水中 $\delta^{18}\text{O}$

Fig. 1 Comparison between the daily variations of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and water in upper soil layer in the central Tibetan Plateau during the summer of 1998

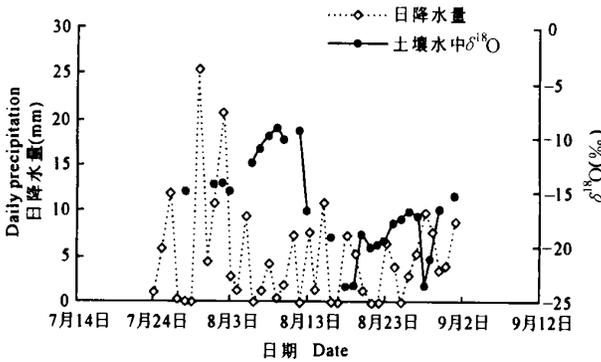


图 2 降水量对表层土壤中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响

Fig. 2 The impact of precipitation on $\delta^{18}\text{O}$ in water of upper soil layer

2.2 地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化

图 3 给出了不同深度土壤剖面水压力随时间的变化。水压力 ($\text{cm H}_2\text{O}$) 低于 0 表示未饱和, 而高于 0 表示土壤水已处于饱和状态。水中观测地点的地下水从 8 月初开始就在 100cm 以上。结果表明 100cm 土壤水(实际已为地下水)中 $\delta^{18}\text{O}$ 的日变化相当平缓, 地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化很小, 在我们的观测时间段内地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化幅度小于 1‰(图 4)。这表明降水对地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的直接影响不显著。在观测阶段 100cm 地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出上升的趋势, 而同期降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出下降的趋势, 这可能是由于地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化明显滞后于降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化所致。但如果在降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 幅度太大而且降水量也足够大的情况下, 100cm 地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化也可以显示出来。在 1998 年 8 月 18~19 日整个研究地区发生一场暴雨, 这次降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值低至 -27‰ , 降水量较大, 两日降水量达 23mm。在 100cm 处地下水中可以看到一个低值, 但这一低值滞后于降水的低值 1 天, 出现在 8 月的 19~20 日(图 4)。

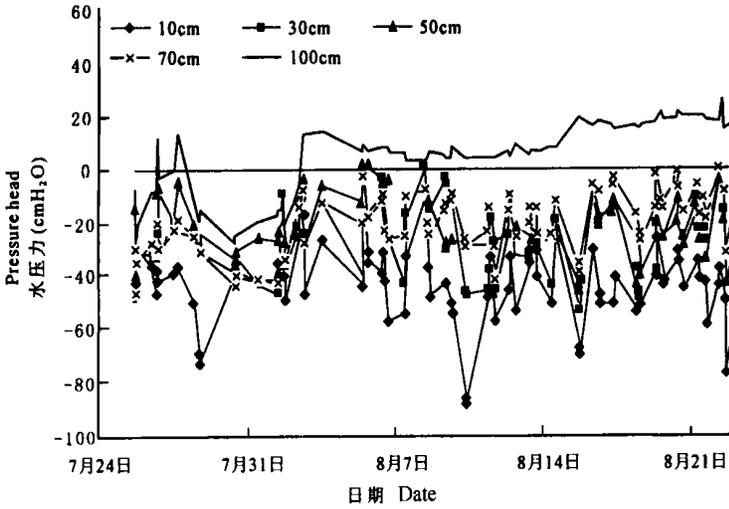


图3 那曲地区不同深度土壤剖面中水压力随时间的变化

Fig. 3 Variation of hydraulic head (cm H₂O) at different depths

从地表层到 100cm 地下水中, 氧稳定同位素的变化很大。在地表土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势还与降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势相当一致; 而在地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化相当小, 并且对降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化的直接响应也很弱。由此看来, 地下水最终受降水的影响, 但降水对地下水的直接影响并不十分显著。地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的稳定性说明地下水代表了多年降水的平均状态, 而不是一个夏季降水的总和。这也可以从 1998 年那曲降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的权重值与地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的比较看出(图 5), 地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的权重值远高于研究地区 1998 年夏季降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 权重值的变化。这同样说明了该地区地下水并不是由 1998 年夏季降水形成的, 而是多年降水的一种平均状态。由此看来, 该地区地下水在水量平衡中起着重要作用。地下水对一个地区水中稳定同位素的变化起着显著的缓冲作用, 使得地下水, 以至于河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化远小于降水。

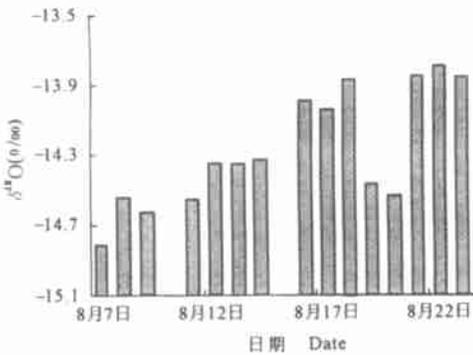


图4 1998年夏季那曲100cm地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 日变化
Fig. 4 Daily variation of $\delta^{18}\text{O}$ in groundwater at 100 cm depth during the summer of 1998

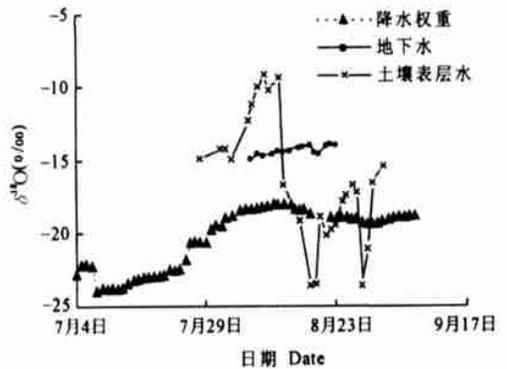


图5 那曲100cm土壤水、地表土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和夏季降水 $\delta^{18}\text{O}$ 权重值的对比
Fig. 5 Comparison between $\delta^{18}\text{O}$ in 100cm groundwater, water in upper soil layer and precipitation-weighted $\delta^{18}\text{O}$ in this summer

2.3 不同深度土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化

图6(a)为1998年8月19日那曲0~5cm、10cm、20cm、30cm、70cm和100cm不同深度的土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化。上层土壤水中在0~5cm $\delta^{18}\text{O}$ 值很低,向下到10cm时迅速升高,然后逐渐降低,到70cm以下时基本趋于稳定。该剖面土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布形式实际反映了降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征(图1)。因为8月18~19日一次大的降水过程中 $\delta^{18}\text{O}$ 很低,土壤表层0~5cm处水中 $\delta^{18}\text{O}$ 对应于这次降水过程,而且这次形成的降水还没有渗入10cm的深度;10cm处较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 对应于18日以前降水中较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,因为8月13~16日降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 很高,接近于-10‰;而在13日以前降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较低,接近于-15‰,对应于20~30cm深土壤水中的 $\delta^{18}\text{O}$;继续往下,土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 趋于稳定,接近于地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值。

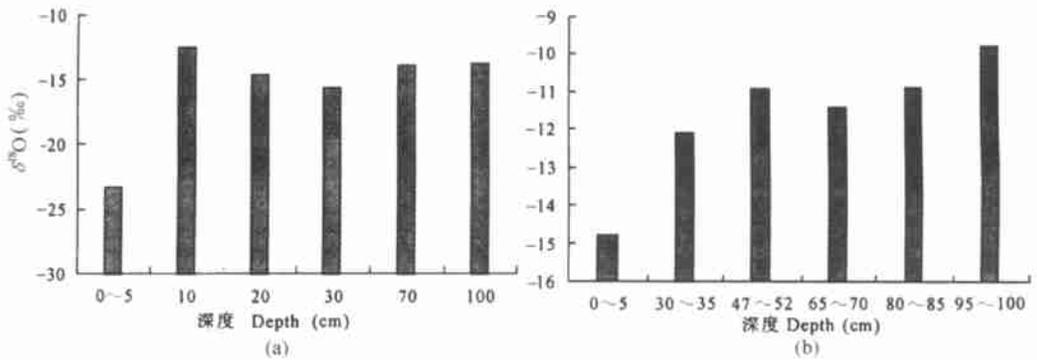


图6 1998年8月19日(a)和7月28日(b)那曲土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随深度的变化

Fig 6 Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in soil water with depth observed in August 19(a) and July 28(b) in 1998

图6(b)为1998年7月28日那曲站土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 随深度的变化。其表层土壤水中-15‰的 $\delta^{18}\text{O}$ 和当时降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 在同一水平(图1)。向下土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 升高,在95~100cm处土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 为-10‰左右,远高于前面所述的地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的-14‰的值,可能是前期降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 较高的缘故。因为在7月28日时地下水还没有上升到100cm的高度,这可以从图3所示的土壤水静压力在100cm的分布曲线上看出。

由以上看来,不同深度土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布实际上很好地记录了降水从地表向地下渗滤的过程,用土壤水中稳定同位素的变化来研究水分在土壤中的迁移过程不失为一种有效的方法。

土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的影响,在地表层最为明显,沿土壤剖面由上向下,这种影响越来越不显著。图7所示的土壤剖面中不同层位土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的波动,在表层变化最大,向下变化幅度越来越小,并逐渐接近地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的值。造成土壤剖面中 $\delta^{18}\text{O}$ 这种变化特征的可能原因至少有两个:(1)地下水与接近地下水的土壤层的水分交换相当活跃,结果使得接近地下水面的土壤水中 $\delta^{18}\text{O}$ 受地下水的影响较大,而 $\delta^{18}\text{O}$ 变化较小;(2)在降水从地表向地下水渗透的过程中,新降水并没有完全替代土壤中原有的水分,只是替代了一部分,这种现象越向土壤层下部表现得越显著。

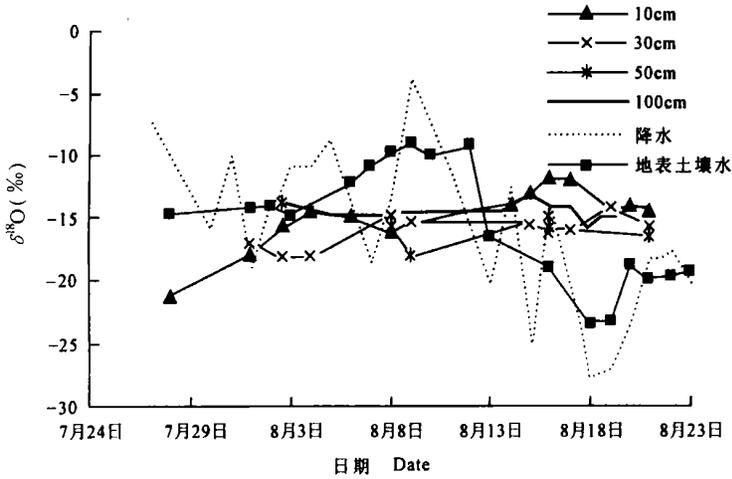


图7 那曲1998年夏季降水及不同深度土壤剖面中 $\delta^{18}\text{O}$ 随时间的变化

Fig 7 Temporal variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and soil water in different depths

致 谢 野外工作得到了阎宇平博士协助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

1. IAEA (International Atomic Energy Agency). Isotopes in (edited by IAEA editorial staff) Water Resources Management. IAEA Publ., Vienna Vol. 2, 1996
2. Senturk F, Bursali S, Omay Y, *et al.* Isotope techniques applied to groundwater movement in the Konya plain In: IAEA editorial staff ed Isotope Hydrology 1970. IAEA Publ., Vienna 1970. 153~ 161
3. Frohlich K, Sanjidorj. Some results on the use of environmental isotope techniques in groundwater resources studies in Mongolia. In: IAEA editorial staff ed Isotopes in Water Resources Management (Volume 2). IAEA Publ., Vienna, 1996, 171~ 174
4. Gat J R, Tzur Y. Modification of the isotopic composition of rainwater by processes which occur before groundwater recharge. In: IAEA editorial staff ed Isotopes in Hydrology. IAEA, Publ., Vienna, 1966. 49~ 60
5. 章新平, 施雅风, 姚檀栋. 青藏高原东北部降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化特征. 中国科学(B辑), 1995, 25(5): 540~ 547
6. 田立德, 姚檀栋, 杨志红. 青藏高原降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的空间分布特征及影响因素. 见: “青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究” 学术论文年刊(1995). 北京: 科学出版社, 1995. 243~ 250
7. Tsujimara M, Tanaka T, Onda Y. Effect of subsurface flow on the isotopic composition of soil water in headwater basins. In: Kovar K., Tappeiner U, Peters N E, Craig R G. eds. Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters. IAHS Publ., 248, 1998. 343~ 351

STABLE ISOTOPE IN SOIL WATER IN THE MIDDLE OF TIBETAN PLATEAU

Tian Li-de¹ Yao Tan-dong¹ M. TSUJIMURA² Sun Wei-zhen¹

(1 *Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000;*

2 *Institute of Geoscience, Tsukuba University, Japan*)

Summary

Based on the measured $\delta^{18}\text{O}$ in soil water and precipitation in the middle of the Tibetan Plateau in the summer of 1998, relationship between $\delta^{18}\text{O}$ in soil water and soil water movement is discussed in this paper. The results show that $\delta^{18}\text{O}$ in soil water in the upper layer is affected directly by $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation, and both vary in the same trend, whereas $\delta^{18}\text{O}$ in the underground water is not much affected by $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation directly, and it varies slightly. This indicates that the underground water there is not replenished from precipitation in the current summer, but from accumulation of several years precipitation. The variation of $\delta^{18}\text{O}$ in different layers of the profile soil reflects the movement of precipitation water from surface towards bottom in the soil. The impact of precipitation on $\delta^{18}\text{O}$ in soil water is obvious only in the water of the upper soil layer, while the underground water has more impact on $\delta^{18}\text{O}$ in soil water of the lower layer, showing the important role of ground water in soil water movement.

Key words Soil water, Stable isotope, Water movement, Central Tibetan Plateau