

准噶尔盆地降水、土壤水和地下水中 ^{18}O 和 D 变化特征 ——以中国生态系统研究网络阜康站为例*

李 晖^{1,2}, 蒋忠诚³, 周宏飞^{4,5}, 王 月^{1,2}, 崔天顺^{1,2}, 李 艺^{1,2}, 罗为群³

(1. 广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西环境工程与保护评价重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 4. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 中国科学院 阜康荒漠生态研究站, 新疆 阜康 831505)

摘 要: 本实验的研究材料(融雪水、雨水、土壤水、地下水)采集于 2006 年 3 - 6 月, 取自位于古尔班通古特沙漠南缘中国科学院阜康荒漠生态系统研究站及北沙窝实验点, 对其氢氧稳定性同位素比率 ^{18}O 和 D 的测定结果进行了分析, 研究了降水、土壤水稳定同位素变化特征, 揭示干旱荒漠区降水和土壤水的关系。研究结果表明, 表层 10 cm 土壤水受降水的直接影响, 其 ^{18}O 具有与降水相同变化的趋势; 地表浅层土壤水的稳定性同位素比率介于雪水和雨水之间; 不同时间剖面土壤水的 ^{18}O 和重量含水量均为表层 10 cm 变化最大, 具有向下变幅逐渐减少的趋势。地下水中 ^{18}O 在不同季节变化差异不大, 地下水有一致、稳定的水源供应。本研究为稳定同位素技术在水循环研究中的应用提供了实例, 也为古尔班通古特沙漠生态系统维持与恢复提供科学依据。

关键词: ^{18}O ; D ; 古尔班通古特沙漠; 大气降水; 土壤水

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2008)05-0105-04

Variation Characteristics of Oxygen and Hydrogen Stable Isotope in Precipitation, Soil Water and Groundwater in the Junggar Basin —Taking Fukang Station of Desert Ecology as a Case

LI Hui^{1,2}, JIANG Zhong-cheng³, ZHOU Hong-fei^{4,5}, WANG Yue^{1,2},
CUI Tian-shun^{1,2}, LI Yi^{1,2}, LUO Wei-qun³

(1. College of Environment & Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. The Guangxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Protection and Assessment, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 5. Fukang Station of Desert Ecology, Fukang, Xinjiang 831505, China)

Abstract: In this study, the research substances, including snow melt, rain water, soil water, groundwater, were collected from Fukang Station of Desert Ecology of Chinese Academy of Science located in the southern part of Gurbantunggut desert. During the experiment, we analyzed the ratio of the oxygen and hydrogen stable isotopes, researched the feature of changing in stable isotope of the precipitation, soil water and groundwater. The results show that: in spring, the ^{18}O in soil water which belongs to top soil with 10 cm is affected by the one in precipitation directly, and the tendency of its change resembles to that of the ^{18}O in precipitation. The differences among ^{18}O in groundwater in different seasons are not noticeable. Furthermore, the impact degree of different factors on the variations of stable oxygen isotope in the process of water cycle and their interaction are evaluated in the study, which provides an example for the application of stable isotopic technique to the study on water cycle.

Key words: oxygen stable isotope; hydrogen stable isotope; Gurbantunggut Desert; precipitation; soil water

为监测中国生态环境变化, 综合研究中国生态环境和资源方面的重大问题, 中国生态系统研究网络(CERN)于 1988 年开始组建成立。面对 CERN 水分问题研究不足的情况,

在 CERN 现有台站基础上, 联系目前国际上正在开展的有关研究计划, 如 GNIP、LeafNet 等, 探索开展 CHNIP、CHLeafNet 的组织和研究工作^[1]。

* 收稿日期: 2008-01-07

基金项目: 广西环境工程与保护评价重点实验室研究基金(桂科能 0704 K039)和广西师范大学青年基金重点资助

作者简介: 李晖(1981 -), 男, 河南南阳人, 讲师, 主要从事植物生态、水文水资源与生态环境研究。E-mail: lh1029@126.com

自 1953 年 Dansgaard 对大气降水中的 ^{18}O 进行研究以来^[1],稳定同位素技术在水文循环研究中得到了广泛的应用,尤其是近 20 年里,稳定同位素技术作为一项比较成熟的技术,其应用领域扩展到植物生理学、生态学和环境科学等学科研究中^[2-6]。此项技术在我国生态系统的研究和以生态系统为主要研究对象的跨学科综合性研究中尚属空白,因此,CERN 有必要加强相关技术的引进和发展。作为水循环输入部分的大气降水中 D 与 ^{18}O 同位素的时空差异,必然导致水循环其他部分土壤水、地表水及地下水等也产生时空差异。这些研究工作在国内外基本处于空白状态。

依托 CERN 野外台站——阜康站,定时采集不同水体水样,利用 CERN 配置的世界较先进水平同位素仪器,测定不同水体中氢氧同位素含量,分析其变化规律;通过分析大气降水环境同位素的变化规律,结合相关气象资料,探讨各种生态系统的大气环流形成模式,为研究其变化规律及气候效应提供依据,为建立中国不同水体稳定同位素研究网络作预研究和准备工作。

1 样品的采集和分析

1.1 自然概况

研究区位于古尔班通古特沙漠南缘的北沙窝实验点(N44°22'17.7",E87°55'38.5",海拔 445 m)。南北向的树枝状沙垄,垄间平地相间分布,沙垄高度一般在 3~5 m,建群种以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和白梭梭(*Haloxylon persicum*)为主。研究区气候属于温带大陆性荒漠气候,夏季炎热干燥,冬季寒冷,降水量一般年份不足 100 mm,蒸发量在 2 500 mm 以上,无霜期平均 156 d。冬季降雪占全年降水量 1/3 以上。地下水位 5~10 m 随季节变化不大。冬季有稳定的积雪存在,春季融雪水加上雨水,是土壤水分最丰富的时期,为植物萌发和生长提供了丰富的水分来源。研究区内分布有稀疏的梭梭林、一年生及短命、类短命植物^[7]。

1.2 样品采集与分析

利用梭梭林内的雨量筒采集雨水水样。采集时间是每次雨后或夜间降雨的次日清晨,以减少蒸发作用的影响。土壤样品采用土钻法,取 0~10 cm,10~30 cm,30~50 cm,50~70 cm,70~100 cm 等不同深度土样,土壤随机钻取 5 个土样混合。地下水水样则直接从地下水位观测井内采集,每 10 d 采集 1 次地下水水样和土壤样,所有水样和土样均用统一规格的 8 ml 玻璃瓶装,现场密封后带回实验室,在冰箱内 4℃ 恒温保存。所有水样的氢、氧稳定性同位素比率的测定是在中国科学院植物所生态中心生态和环境科学稳定同位素实验室和中国生态系统研究网络采用稳定性同位素气体质谱仪(DELTAplusxp,德国)和 TC/EA 气体质谱仪进行。

氢氧稳定同位素组成采用是千分偏差值(‰)表示,即根据国际上规定统一采用待测样品中某元素的同位素比值与标准物质的同种元素的相应同位素比值的相对千分差作为量度,记作 ‰。氢、氧稳定性同位素的比率值是以相对于 SMOW(Vienna Standard Mean Ocean Water)的千分率(‰)给出,以 X 表示:

$$X = [(R_{\text{sam}} - R_{\text{std}}) / R_{\text{std}}] \times 1000$$

其中 X 为某种元素的同位素, R_{sam} 是该元素同位素样品中的重轻同位素丰度之比(如: $^{18}\text{O}_{\text{sam}}/^{16}\text{O}_{\text{sam}}$ 和 $^2\text{H}_{\text{sam}}/^1\text{H}_{\text{sam}}$); R_{std} 是国际通用标准物的重轻同位素丰度之比(如 $^{18}\text{O}_{\text{sam}}/^{16}\text{O}_{\text{sam}}$ 和 $^2\text{H}_{\text{std}}/^1\text{H}_{\text{std}}$)。 ^{18}O 和 D 的精度分别为 $\pm 0.3\%$ 和 $\pm 2\%$ 。

2 结果与分析

2.1 降水 ^{18}O 变化

大气降水中 D 与 ^{18}O 之间的关系称大气水线(MWL),它对于研究水循环过程中稳定同位素的变化具有重要意义。根据不同地区收集的大量雨水资料分析,Craig 提出了降水样品对 SMOW 的 ^{18}O 和 D 值成线性关系的全球大气降水线方程(GMWL),在全球尺度下,这种关系表现为^[8]

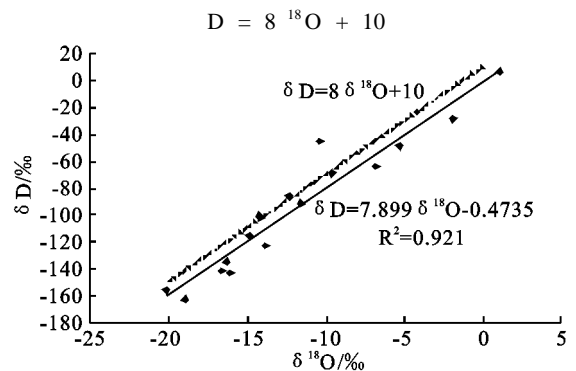


图 1 古尔班通古特沙漠南部大气降水中 D 和 ^{18}O 的关系

观测期间(2006 年 3~6 月),降水的 D 和 ^{18}O 变化非常大,其中 ^{18}O 介于 -20.12‰~1.068‰之间,D 介于 -162.86‰~7.315‰之间。二者的变化幅度分别为 163.47‰和 21.19‰。根据实测降水水样的 D 和 ^{18}O 值,用最小二乘法求得降水线方程为: $D = 7.8986^{18}\text{O} - 0.4735$ ($R^2 = 0.921$, $n = 16$) (图 1),该方程与 Craig^[8]提出的全球降水线方程 $D = 8^{18}\text{O} + 10$ 以及郑淑惠等报道的中国降水线方程 $D = 7.9^{18}\text{O} + 8.2$ 相比较^[9],其偏离全球大气降水线,并且梯度小于 8.0。

造成这种差异的主要原因是:古尔班通古特沙漠远离海洋,气候干燥,海洋蒸发的水汽很难直接到达,其水汽来源主要受西风环流的影响,降落到地表的水的重新蒸发在当地水汽来源中也占很大比例。干旱地区表面水体中 ^{18}O 和 D 偏高,因此蒸发水汽中 ^{18}O 和 D 亦偏高。再加上在干旱气候条件下雨滴在降落过程中由于蒸发而产生的重同位素的富集,致使古尔班通古特沙漠地区降水中 ^{18}O 偏高。而 Craig^[8]、郑淑惠^[9]等提出的降水线方程在相当程度上反映了海洋性气候地区的降水氢氧同位素特征。

2.2 土壤水 ^{18}O 变化

2.2.1 表层 10 cm 土壤水 ^{18}O 和降水 ^{18}O 的变化

图 2 给出了春季古尔班通古特沙漠表层 10 cm 土壤水 ^{18}O 和降水的 ^{18}O 的变化特征。3 月 15 日到 5 月 10 日期间,降水中 ^{18}O (‰)的值为 -13.86~-5.14,5 月 1 日 ^{18}O 值出现跳跃, ^{18}O (‰)为 -5.27,其原因是受 29 日和 30 日

连续降雨的影响引起的。土壤水 ^{18}O 值(‰)也表现出依次降低的变化趋势,从 $-16.77 \sim -6.01$,波动比较平缓。可以看出,表层土壤水中 ^{18}O 的波动幅度小于降水,表层 10 cm 土壤水 ^{18}O (‰)相对降水的 ^{18}O (‰)发生富集,表层水分的强烈蒸发是导致土壤水 ^{18}O (‰)富集的主要原因^[10],但总的来说,表层 10 cm 土壤水中 ^{18}O 与降水中的 ^{18}O 变化有比较一致的趋势,相关分析的结果显示,两者之间的相关系数 $R=0.83$,而降水中的 ^{18}O 与 30 cm 和 50 cm 土壤水 ^{18}O 则没有明显的相关关系。

2.2.2 不同深度土壤水 ^{18}O 变化

图 3 是不同时间土壤剖面不同深度土层中土壤水 ^{18}O 和重量含水量的变化图。可见,土壤水 ^{18}O 和重量含水量均在表层 10 cm 变化最大,具有向下变幅逐渐减少的趋势;70 cm 和 100 cm 的土壤水 ^{18}O 数据接近地下水的 ^{18}O 值, ^{18}O 的值具有随着深度的增加,接近地下水 ^{18}O 的趋势。不同深度土壤水中 ^{18}O 的空间分布实际上很好地记录了降水从地表向地下入渗的过程,以及受蒸发作用地下水或深层土壤水向上运移的过程。由于入渗和蒸发过程在土层中交替进行,造成土壤浅层剖面中 ^{18}O 和土壤含水量之间的关

系趋于复杂。 ^{18}O 变化特征的可能原因至少有两个:(1)地下水与接近地下水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 ^{18}O 受地下水的影响较大,而 ^{18}O 变化较小;(2)在降水从地表向土壤入渗的过程中,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的也越显著。因此,不同深度土壤水中 ^{18}O 的时空分布可以很好地记录降水从地上向地下入渗的过程。

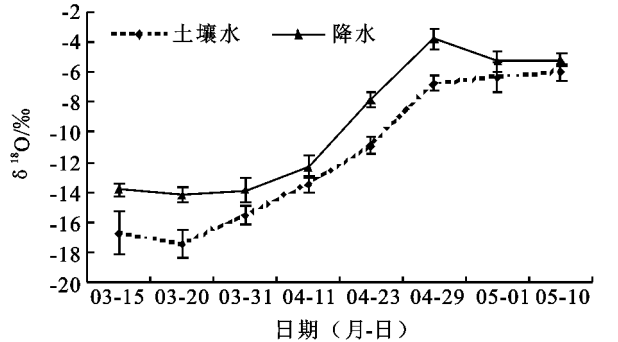
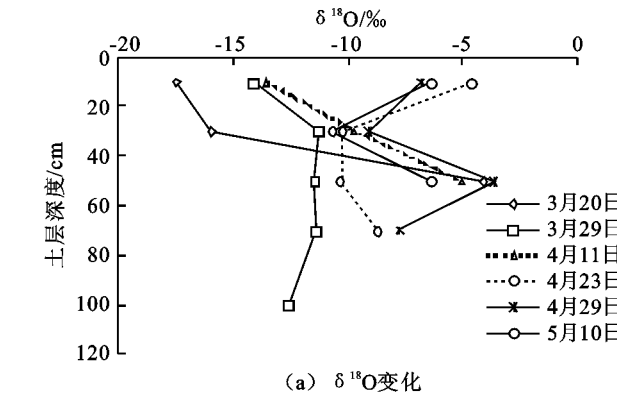
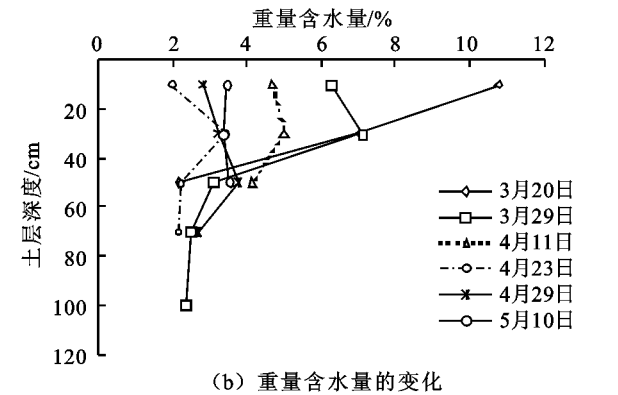


图 2 表层 10 cm 土壤水分中 ^{18}O 和当地日降水中 ^{18}O 的变化



(a) $\delta^{18}\text{O}$ 变化



(b) 重量含水量的变化

图 3 古尔班通古特沙漠不同深度土层中土壤水 ^{18}O 和重量含水量随时间的变化

2.3 地下水中 ^{18}O 变化

地下水中 ^{18}O 在不同季节变化差异不大 (ANOVA, $df=6$, $p=0.9602$),说明地下水有一致、稳定的水源供应。地下水的稳定性同位素对应散点主要分布于大气水线 LMWL 上和降水的分布区域 (图 2)。地下水中的 ^{18}O 受降水中的 ^{18}O 的直接影响不明显,可能代表多年降水的平均状态。同时地下水的稳定性同位素也显示出较小的波动性,说明地下水具有较长的滞留时间,其波动主要来自大气降水过程的补给影响。

2.4 降水、土壤水和地下水的 D 和 ^{18}O 关系

由图 4 看出,降水的稳定性同位素值均明显高于土壤水、植物水的相应值。降水的对应散点几乎全部分布于地区大气降水线 (LMWL) 上或者以上。而浅层土壤水植物水的对应散点则大部分分布于 LMWL 线下。同时可以看出植物水的对应散点的分布区域介于土壤水和降水之间,其 D (‰) 的变化为 $-124.56 \sim -90.12$, ^{18}O (‰) 的变化为 $-11.68 \sim -7.31$ 。而地下水对应散点的分布区域几乎与雨水相同,其 D (‰) 变化为 $-88.76 \sim -73.04$, ^{18}O (‰) 的变

化为 $-12.23 \sim -9.99$ 。统计也发现,地下水稳定性同位素值与雨水的稳定性同位素值没有显著的差异,也可以说明,沙漠区地下潜水几乎没有受到蒸发分馏作用的影响,地下潜水补给主要来自降雨,没有直接证据显示当年有春季的积雪融水补给地下水,地下潜水的稳定性同位素值可能代表了多年降水的平均状态^[11]。

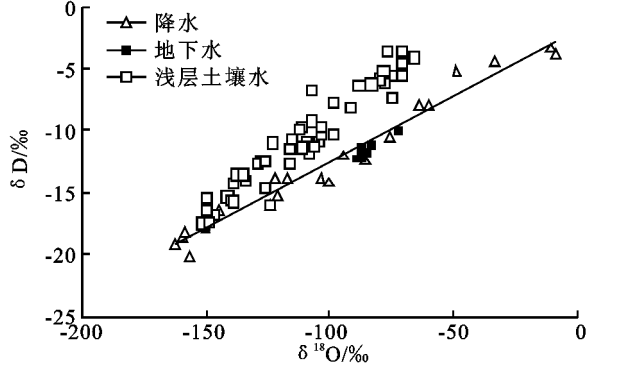


图 4 古尔班通古特沙漠南部降水、浅层土壤水和地下水的 D 和 ^{18}O 关系散点图

3 结论

(1) 不同季节大气降水中 ^{18}O 的变幅较大, 具有夏高冬低的变化特征。

(2) 地表浅层土壤水的稳定性同位素比率介于雪水和雨水的同位素比率之间, 表明春季浅层土壤水来源于雪水和雨水的补给。春季表层 10 cm 土壤水的 ^{18}O 受降水中 ^{18}O 的直接影响, 并且与降水中 ^{18}O 有相同的变化趋势。不同时间土壤剖面土壤水的 ^{18}O 和重量含水量均在表层 10 cm 变化最大, 具有向下变幅逐渐减少的趋势。

(3) 地下水中 ^{18}O 在不同季节变化差异不大, 地下水有一致、稳定的水源供应。

参考文献:

- [1] 宋献方, 于静洁. 国际环境同位素水文学会议纪要及我国的研究对策[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 114-115.
- [2] Dansgaard W. The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapor[J]. Tellus, 1953, 5(4): 461-469.
- [3] Kendall C, McDonnell J J. Isotope tracers in catchment hydrology[M]. Elsevier: Amsterdam, 1998.
- [4] Adams M A, Grierson P F. Stable isotopes at natural abundance in terrestrial plant ecology and ecophysiology: an update[J]. Plant Biology, 2001, 3: 299-310.
- [5] Tang K. The effect of soil hydrology on the oxygen and hydrogen isotopic compositions of plants' source water[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 185(3/4): 355-367.
- [6] Wang Guo hong. Can the restoration of natural vegetation be accelerated on the Chinese Loess Plateau: A study of the response of the leaf carbon isotope ratio of dominant species to changing soil carbon and nitrogen levels. [J]. Ecol. Res., 2006, 21: 188-196.
- [7] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点[J]. 生态学报, 2002, 22(11): 1923-1932.
- [8] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133: 1702-1703.
- [9] 郑淑慧, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素的研究[J]. 科学通报, 1983(13): 801-806.
- [10] Gazis C, Feng X. A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths [J]. Geoderma, 2004, 119: 97-111.
- [11] Ehleringer J R, Dawson T E. Water uptake by plants: perspectives from stable isotope composition[J]. Plant Cell and Environment, 1992, 15: 1073-1082.

(上接第 104 页)

参考文献:

- [1] 高甲荣, 肖斌, 牛健植. 河溪近自然治理的基本模式与应用界限[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 84-91.
- [2] 高甲荣. 近自然治理: 以景观生态学为基础的荒溪治理工程[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(1): 80-85.
- [3] 杨凯, 唐敏, 刘源, 等. 上海中心城区河流及水体周边小气候效应分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2004(3): 105-114.
- [4] 邵俊, 杨凯, 吴阿娜, 等. 上海张家浜河道综合整治效益分析及评价[J]. 水资源保护, 2004(4): 8-10.
- [5] 周志翔, 邵天一, 唐万鹏. 城市绿地空间格局及其环境效应: 以宜昌市中心城区为例[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 186-192.
- [6] Unger J. Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central European city [J]. Int J. Biometeorol, 1999, 43: 139-144.
- [7] 王远飞, 沈愈. 上海市夏季温湿效应与人体舒适度[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1998(3): 60-66.
- [8] 康博文, 王得祥, 刘建军, 等. 城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 54-56.
- [9] 雷霆, 崔国发, 陈建伟, 等. 北京市湿地维管束植物多样性及优先保护级别划分[J]. 生态学报, 2006, 26(6): 1675-1685.
- [10] 王重云, 刘文耀, 刘伦辉, 等. 紫茎泽兰迹地上不同替代植物群落植物多样性的变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 377-383.
- [11] 乔锋, 张克斌, 张维军, 等. 宁夏盐池县不同荒漠化治理措施生物多样性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 54-57.