

哈思山地区泉水成因及其氢氧稳定同位素特征探讨

邢晓红, 刘桂民, 李红琴, 胡广录

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:哈思山位于我国西北干旱半干旱地区, 具有非常重要的区域生态效应。2013年5月到2014年1月, 对该地区9个采样点的泉水流量进行了逐月采样, 并测定了水体氢氧稳定同位素, 研究了泉水流量的变化规律及氢氧稳定同位素的特征。调查结果显示, 哈思山泉水为基岩裂隙水, 泉水流量无明显的季节性变化, 可能受包气带、土壤的持水性及汇水面积和海拔高度等因素的影响。同位素研究结果显示, 氢氧稳定同位素值没有明显的季节性变化, 且呈现 $\delta D=5.7439\delta^{18}O-10.6535$ 的线性关系, 表明泉水的补给来源主要是大气降水, 且林区受到强烈蒸发作用的影响; 此外, $\delta^{18}O$ 值与泉所在海拔高度之间存在显著的线性关系, δD 值也存在一定的海拔效应, 但并不显著。最终研究表明, 位于半干旱地区的哈思山山区的水文过程十分复杂, 泉水流量影响因素较多。

关键词:哈思山; 干旱半干旱地区; 泉水流量; 稳定同位素

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)02-0046-05

水资源短缺是当前全球面临的一个严峻问题, 合理利用现有水资源是目前最行之有效的解决方法, 而其重要前提之一就是了解水循环机理^[1]。同位素技术和方法可以有效地示踪水循环, 为确定各类水体的成因和演化机制提供重要的信息, 从而为合理利用水资源提供参考^[2]。

目前, 同位素技术已广泛应用于水文与环境地质等诸多领域。在澳大利亚, 利用同位素技术研究中部地区大自流盆地的地下水系统, 分析地下水运动规律和地下水龄, 为合理利用地下水提供了重要信息^[3]。我国学者利用氢氧同位素和水化学方法对三江平原地带进行了研究, 结果表明降水是地表水和地下水的补给源, 地表水与地下水的水力联系较强, 应该作为统一进行水资源管理^[4]。在西北地区的水文水资源研究中, 环境同位素技术的应用也在逐步增多。有研究利用稳定同位素(2H 和 ^{18}O)及水化学方法识别地下水的补给来源, 分析了大气降水、地表水、地下水的三水转化关系, 提供了传统水文地质方法不能提供的水文地质信息^[5-6]。

我国西北干旱半干旱地区水循环过程复杂, 地表

水与地下水频繁转换, 流域气象站点稀少^[7], 相对于华北平原等地区而言, 目前关于西北地区地下水的来源和补给方面的研究主要集中于黑河、石羊河和疏勒河这三大内陆河流域, 而对于其他地区的了解还很少。哈思山位于甘肃靖远县, 属于干旱半干旱区, 有着甘肃省中部少有的大片森林, 林区面积约84km², 哈思山林区有众多的泉水发育。这为研究干旱半干旱地区森林生态水文学提供了良好的研究条件, 本文即对该地区泉水的流量及氢氧稳定同位素进行研究, 旨在分析哈思山泉水流量的影响因素, 了解其水资源循环的特征及过程。同时, 哈思山泉水是当地数万人赖以生存的重要水源, 对该地区的森林生态水文的研究还可为本区域森林资源的保护和水资源的开发利用提供参考。

1 区域概况

哈思山位于甘肃靖远县西北部, 在北纬36°58'20"~37°02'40", 东经104°18'40"~104°35'00"之间^[8], 是北部祁连山系皱褶断陷东延隆起形成的, 山体由变质岩、花岗岩、闪长岩组成^[9], 哈思山东段为祁连山余脉, 从

收稿日期: 2015-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41261002, 41161082)

作者简介: 邢晓红(1991-), 女, 甘肃张掖人, 硕士, 主要研究方向为生态水文。E-mail: 15294193169@163.com

通讯作者: 刘桂民(1977-), 女, 甘肃靖远人, 博士(硕士生导师), 主要研究方向为生态水文。E-mail: guiguixd@163.com

东往西大多为石质山地,地质构造上多为断层结构。山区最高海拔为 3 017m,最低为 1 300m,地形由南向北倾斜,主要由泥盆系的陆相紫红色粗碎屑岩和局部夹玄武岩组成,其南侧为一条西北至东南方向的活断层,见图 1。

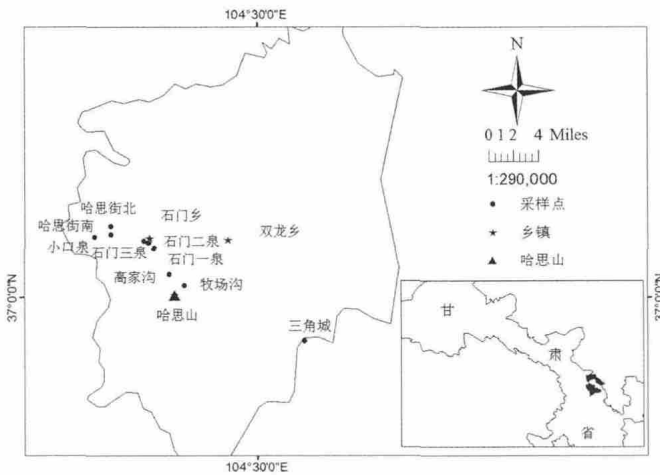


图 1 研究区地理位置及采样点分布

Fig.1 The geographical position and the distribution of the sampling sites in the study area

研究区域属于温带干旱半干旱气候,受森林环境的影响,林区小气候相对温凉湿润,年平均气温6~8℃,平均年降雨量在 230mm 左右。本研究期间,逐日降雨量如图 2 所示。可见,降雨主要集中于 6、7、8 三个月。受森林植被垂直分布的影响,哈思山土壤呈垂直带谱分布:2 400 m 以下为山地栗钙土、灰钙土;2 400~2 800 m 为山地灰褐土;阴坡、半阴坡次生林覆盖的地方为淋溶褐土;2 800 m 以上为亚高山草甸土。哈思山所有植被类型的土壤渗透特性均较好,能有效地渗透降水,防止和减少地表径流^[8]。受地层结构、地质结构、地形等水文地质条件的影响,哈思山泉水为基岩裂隙水。

2 采样和分析

根据现场调查,哈思山周边共有 9 个泉眼,本研究对这些泉眼全部进行采样,具体采样点如图 1 所示。其中,哈思街北泉和哈思街南泉位于阴坡坡脚,为山间冲沟;石门一泉位于松山坡脚,水来源为松山;石门二泉和石门三泉位于坡脚,但三泉是在阳坡呈管流状态;小口泉位于山谷,为沟渠;牧场沟在山坡上,是草原灌木区;三角城位于山脚,高家沟位于阴坡坡脚,为管流。其中高家沟泉眼流量最少,在研究后期 2013 年 11 月已断流。

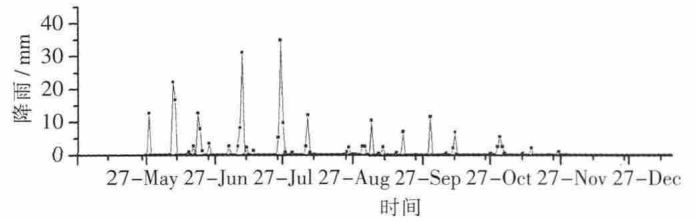


图 2 采样期间哈思山的逐日降雨量 / mm

Fig.2 The daily precipitation in the Hasi mountain during the sampling period

从 2013 年 5 月到 2014 年 1 月,在根据林区类型,泉水流量大小所确定的代表性采样点上,共采集到 85 个泉水样。泉水流量采用流量计(SHY-FP101)测定,每月测定一次。密封水样中的 δD 和 δ¹⁸O 采用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 LGR DLT-100 液态水同位素分析仪测定,分析精度分别为 ±0.6‰ 和 ±0.3‰。测得的水样中氢氧同位素结果为相对于维也纳标准平均海水(Vienna Standard Mean Oceanic Water V-SMOW)的千分差,表示为

$$\delta = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) \times 1000 / R_{\text{standard}}$$

式中: R_{sample} 为水样中 D 或 ¹⁸O 的浓度; R_{standard} 为 V-SMOW 中 D 或 ¹⁸O 的浓度。取 1~1.5 ml 水样放入分析盘,分析时抽取 6 针,取后 3 针测得的同位素的平均值记为测试结果。

3 结果

3.1 泉水流量特征

3.1.1 泉水流量时空分布

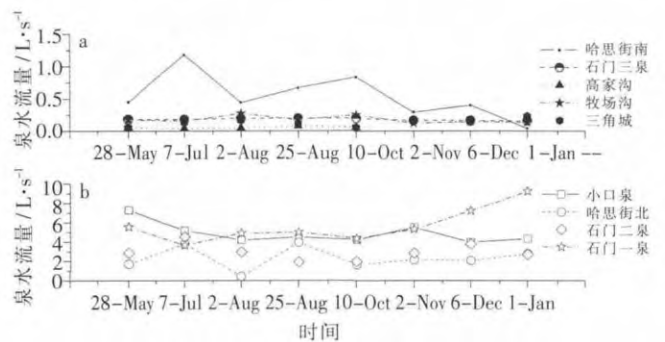


图 3 泉水流量时空分布(a.平均流量小于 1 L/s;b.平均流量大于 1L/s)

Fig.3 The spatial and temporal distribution of the spring flow(a. the mean flow is less than 1L/s; b. the mean flow is higher than 1L/s)

由图 3 可知,哈思山泉水流量没有明显的季节性变化。其中 a 图中的四个泉水流量均较小,哈思街南泉水流量的变化范围在 0.5L/s 左右,而其余泉水

流量变化范围较小,基本保持不变。b图中泉水流量相对较大,且变化幅度大,但不同样点之间未表现出相似的季节变化规律。

3.1.2 泉水流量与海拔高度的关系

从图4中可以看出海拔与泉水流量成负相关,但是相关性不明显。

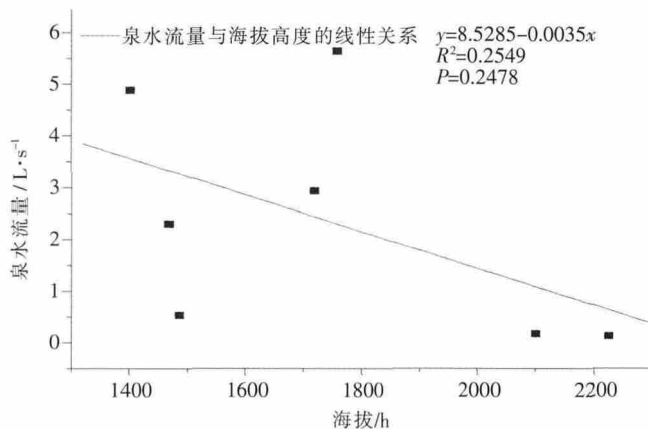


图4 泉水年均流量与海拔的线性关系

Fig.4 The linear relationship between the mean annual spring flow and altitude

3.2 泉水氢氧稳定同位素特征

3.2.1 泉水 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间的线性关系

泉水中 δD 值的大致范围是 $-56‰ \sim -76‰$, $\delta^{18}O$ 值的范围是 $-7.5‰ \sim -11‰$ 。对哈思山泉水进行线性拟合分析(如图5a所示),得到泉水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的线性关系方程:

$$\delta D = 5.7439\delta^{18}O - 10.6535 (R^2 = 0.7384) \quad (1)$$

从哈思山地区采集的泉水的 $\delta^{18}O$ 与海拔高度存在关系

$$\delta^{18}O = -0.00118h - 6.54252 \quad (2)$$

式中: h 为泉所在海拔高度,由此可知 ^{18}O 海拔效应为 $-0.118‰/100m$ 。 $P = 0.0093 < 0.05$,说明哈思山地区泉

水的 $\delta^{18}O$ 与泉所在海拔高度之间存在着显著的线性关系(如图5b所示),表明 $\delta^{18}O$ 值明显的海拔效应。 δD 值的海拔效应则不明显($P = 0.2164$)。

3.2.2 泉水氢氧稳定同位素时空分布

如图6所示,各采样点的氢氧稳定同位素的变化

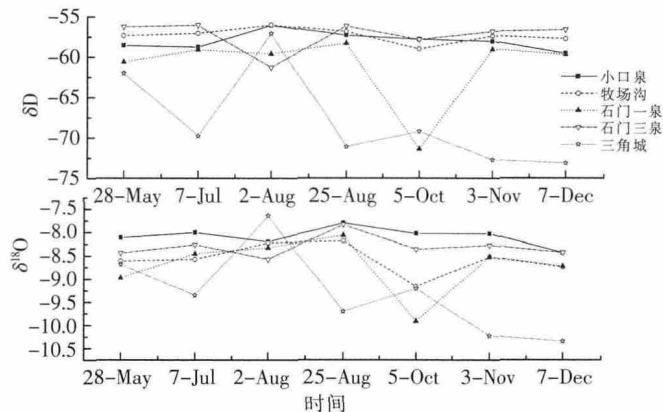


图6 泉水氢氧稳定同位素时空变化

Fig.6 The spatial and temporal change of hydrogen and oxygen stable isotopes of springs

基本一致,且没有明显的季节性变化。图6只比较了5个泉水流量差别较大的点,由图可知,泉水的氢氧稳定同位素值与流量之间也没有明显的相关关系。

4 讨论

4.1 泉水成因及影响泉水流量的因素

受地层结构、地质构造、地形、地表侵蚀基准面等因素的影响,一些地区地下水涌出地面,形成了泉^[10]。我国在这方面的研究主要集中在北京地区和济南地区,这两个地区的泉水主要受大气降水和人为开采的影响^[10-11]。本研究中,哈思山地区的泉水未表现出明显的季节性差异,泉水为自流泉,受人为开采的影响不

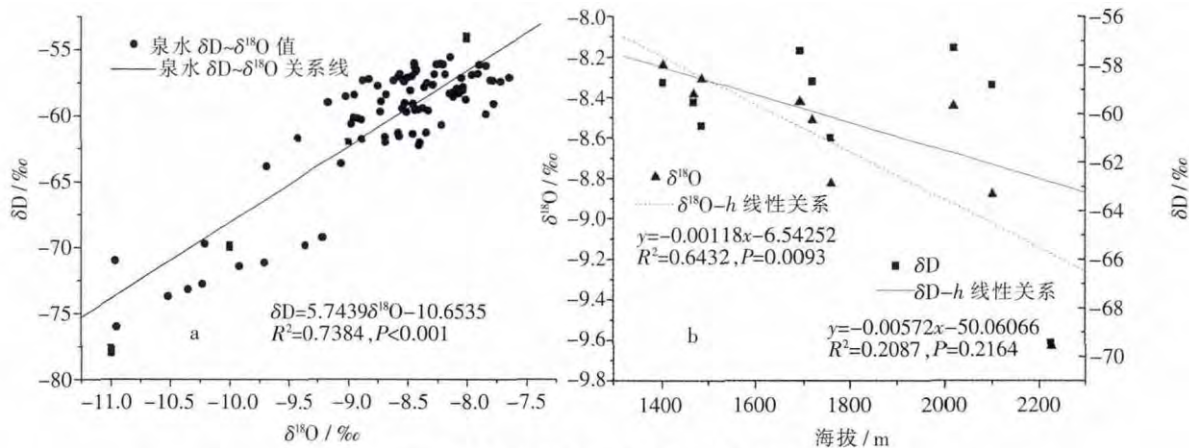


图5 泉水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系(a)及其与海拔高度的关系(b)

Fig.5 The relationship between δD and $\delta^{18}O$ and their relationships with altitude

大。由于地形的复杂性,本研究还难以提取汇水面积;此外,哈思山植被具有明显的垂直分布差异,这意味着土壤持水率存在较大的空间变异,从而使得从空间尺度上分析泉水与土壤水的关系也变得十分困难。但是,本研究区域的降雨有着明显的季节性变化,而泉水流量却没有明显的季节性规律。这表明哈思山的泉水流量对降雨的响应过程受到包气带、土壤的持水性、汇水面积、森林覆盖等因素的影响。这一研究也与先前报道的森林对泉水流量有非常复杂的影响相符合^[12,13]。泉水的出露与地形、地质条件的关系还不够明确,有待进一步的考察。

4.2 泉水稳定同位素特征

通常降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 的斜率在8左右^[14,15]。哈思山泉水的 δ 值位于大气降水线附近,表明泉水的补给来源主要是大气降水。黄土丘陵区泉水 δD 和 $\delta^{18}O$ 的关系是: $\delta D=4.42\delta^{18}O-29.75$ ^[16]云南鹤庆西山泉水的 $\delta^{18}O$ 和 δD 的关系方程为: $\delta D=4.9892\delta^{18}O-37.143$ ^[17],这二者的斜率均小于大气降水线,因为通常情况下,泉水的稳定同位素值是富集的^[18]。德国哈尔茨山区的泉水 $\delta^{18}O$ 和 δD 值分别为: $-10.3‰\sim-6.9‰$, $-68.9‰\sim-45.5‰$, $\delta^{18}O$ 和 δD 的线性关系为: $\delta D=7.0\delta^{18}O+2.8$,斜率略小于8,表明大气降水在补给泉水的过程中受到蒸发作用的影响较小^[19]。哈思山地区泉水 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系线中,斜率为5.7,截距小于10‰,说明泉水形成过程中受蒸发作用的影响较大。

哈思山泉水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 的大致范围分别是 $-76‰\sim-56‰$, $-11‰\sim-7.5‰$,分布不集中。说明泉水不稳定,且蒸发较大,使得水体中氢氧同位素发生了分馏^[20]。同时, δD 和 $\delta^{18}O$ 值没有明显的季节性变化, $\delta^{18}O$ 值受海拔高度的影响较明显,属于干旱半干旱地区的特征^[18],其海拔效应为 $-0.118‰/100m$ 。伊比利亚半岛北部地区的泉水的海拔效应为 $-0.17‰/100m$ ^[21],可见哈思山地区泉水 $\delta^{18}O$ 海拔效应也较明显。 δD 值的海拔效应并不明显。泉水同位素的海拔效应其实是降水同位素高程效应的表现^[22]。

5 结论与展望

(1)哈思山为石质山,泉水为基岩裂隙水且多为自流水,受人为开采的影响不大,研究期间降雨量季节性显著但流量变化并没有明显的季节性变化。在后续研究中需考虑泉水可能受包气带、土壤的持水性及汇水面积和海拔高度等因素的影响。

(2)哈思山地区泉水氢氧同位素方程为 $\delta D=5.7439\delta^{18}O-10.6535$,表明泉水来源主要是大气降水,同时说明哈思山林区蒸发较强,泉水受蒸发作用的影响较大。

(3)哈思山地区泉水氢氧稳定同位素具有明显的干旱半干旱地区特征,没有明显季节性变化,影响因素较为复杂,其中海拔对 $\delta^{18}O$ 的影响比较明显。

本研究分析了哈思山泉水的流量和同位素特征,表明年内时间尺度上,泉水流量对降雨没有即时的响应,且林区蒸发强烈。这提示植被覆盖和土壤类型可能对泉水的产流和分配具有重要的影响,下一步工作需要对于不同植被条件下的土壤水的含量和特征进行研究,从而深入分析半干旱地区森林的生态水文过程。此外,本研所得出的结果对之后要进行的流域内降水、地表水、地下水的三水转化关系研究提供了资料。

参考文献:

- [1] 张应华,仵彦卿. 黑河流域不同水体中 $\delta^{18}O$ 的变化[J]. 水科学进展, 2007,18(6):864-870. (ZHANG Yinghua, WU Yanqing. Variation of $\delta^{18}O$ in water in Heihe river basin[J]. Advances in Water Science, 2007,18(6):864-870.(in Chinese))
- [2] 张应华,仵彦卿,温小虎,等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006,17(5):738-747.(ZHANG Yinghua,WU Yanqing,WEN Xiaohu,et al. Application of environmental isotopes in water cycle[J]. Advances in Water Science, 2006,17(5):738-747.(in Chinese))
- [3] W D.Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus,1964,16(4):436-468.
- [4] 张兵,宋献方,张应华,等. 三江平原地表水与地下水氢氧同位素和水化学特征[J]. 水文, 2014,34(2):38-43. (ZHANG Bing, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Hydrogen and oxygen isotopic and hydrochemical characteristics of water in Sanjiang plain [J]. Journal of China Hydrology,2014,34(2):38-43. (in Chinese))
- [5] 陈宗宇,万力,聂振龙,等. 利用稳定同位素识别黑河流域地下水的补给来源[J]. 水文地质工程地质,2006,3:9-14. (CHEN Zongyu, WAN-Li,NIE Zhenlong, et al. Identification of groundwater recharge in the Heihe basin using environmental isotopes[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006,3:9-14. (in Chinese))
- [6] 董艳辉,马致远. 环境同位素方法对平凉隐伏岩溶水运移分析[J]. 科技资讯, 2012,3:135-137. (DONG Yanhui,MA Zhiyuan.Analysis on migration of water in covered ordovician carbonate rock of Pingliang[J]. Science & Technology Information,2012,3:135-137. (in Chinese))
- [7] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014,69(9):1295-1304.(CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of northwest China[J]. Geographica Sinica,2014,69(9):1295-1304. (in Chinese))
- [8] 杨万军. 哈思山林区森林植被水文效应调查[J]. 中国水土保持,

- 2003,12:24–25. (YANG Wanjun. Investigation of forest vegetation hydrologic effects in Hasi mountain area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2003,12:24–25. (in Chinese))
- [9] 杨万军. 靖远哈思山森林植被水文效应调查与分析[J]. 甘肃林业科技, 2000,25(2):23–26. (YANG Wanjun. Investigation and analysis of forest vegetation hydrologic effects in Hasi mountain, Jinyuan [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2000,25(2):23–26. (in Chinese))
- [10] 翟远征, 王金生, 滕彦国, 等. 北京市泉水的水化学、同位素特征及其指示作用[J]. 地质通报, 2011,30(9):1442–1449. (ZHAI Yuanzheng, WANG Jinsheng, TENG Yanguo, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics of springs in Beijing and their implications [J]. Geological Bulletin of China, 2011,30(9):1442–1449. (in Chinese))
- [11] 李铁锡, 李岚, 刘业筠. 济南泉水特征及影响因素系统分析[J]. 山东国土资源, 2003,6:48–57. (LI Tiexi, LI Lan, LIU Yejun. Systematic analysis of characteristics and effected elements of springs in Jinan city [J]. Land and Resources of Shandong, 2003,6:48–57. (in Chinese))
- [12] 孙惠南. 近 20 年来关于森林作用研究的进展[J]. 自然资源学报, 2011,16(5):407–412. (SUN Huinan. Progress of the research on the role of the forest during the past 20 years [J]. Journal of Natural Resources, 2011,16(5):407–412. (in Chinese))
- [13] 李清艳, 何师意, 康志强. 岩溶森林区地下河流域水文地球化学特征研究——以贵州荔波板寨地下河为例 [J]. 中国农学通报, 2010,26(21):305–311. (LI Qingyan, HE Shi yi, KANG Zhiqiang. Study on hydrogeochemical features in karst forest underground river catchment of Banzhai, Libo, Guizhou [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010,26(21):305–311. (in Chinese))
- [14] Craig, H. Isotopic variations in meteoric waters [J]. Science, 1961,133:1702–1703.
- [15] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983,28(13):801–806. (ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Hydrogen and oxygen isotope research of Chinese precipitation [J]. Chinese Science Bulletin, 1983,28(13):801–806. (in Chinese))
- [16] 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 Beiyang, TIAN Junliang. Experimental study on the precipitation-soilwater-groundwater transformation in loess hilly region [J]. Advances in Water Science, 2010,21(1):16–22. (in Chinese))
- [17] 张文章, 王锦国, 陈舟. 云南鹤庆西山岩溶地下水同位素及水化学分析[J]. 工程勘察, 2015,3:51–54. (ZHANG Wenzhang, WANG Jinguo, CHEN Zhou. Isotope and hydrochemical analysis of karst groundwater in Xishan, Heqing, Yunnan province [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015,3:51–54. (in Chinese))
- [18] Elke Bozau, Hans-Joachim Stork, Gerhard Strauch. Hydrogeochemical characteristics of spring water in the Harz mountains, Germany [J]. Chemie der Erde, 2013,73:283–292.
- [19] Elissavet Dotsika, Spyridon Lykoudis, Dimitrios Poutoukis. Spatial distribution of the isotopic composition of precipitation and spring water in Greece [J]. Global and Planetary Change, 2010,71:141–149.
- [20] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京西山鹫峰地区氢氧稳定同位素特征分析[J]. 水科学进展, 2013,24(5):642–650. (DENG Wenping, YU Xinxiao, JIA Guodong. An analysis of characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in Jiufeng mountain areas of Beijing [J]. Advances in Water Science, 2013,24(5):642–650. (in Chinese))
- [21] De Oliveira, A.C.V., Lima, A.S. Spatial variability in the stable isotopes of modern precipitation in the northwest of Iberia [J]. Isotopes Environ. Health Stud., 2010,46:13–26.
- [22] 宋献方, 刘相超, 夏军, 等. 基于环境同位素技术的怀沙河流域地表水和地下水转化关系研究[J]. 中国科学, 2007,37(1):102–110. (SONG Xianfang, LIU Xiangchao, XIA Jun, et al. Interactions between surface water and groundwater in Chabagou catchment using hydrogen and oxygen isotopes [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007,37(1):102–110. (in Chinese))

Sources of Spring Water and Its Characteristics of Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes in Hasi Mountain

XING Xiaohong, LIU Guimin, LI Hongqin, HU Guanglu

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Hasi Mountain is located in the arid and semi-arid areas of the northwestern China. This mountain plays a very important ecological role in the local environment. Based on the spring flow and the stable isotopes of hydrogen and oxygen of the 9 sampling springs in the mountain area, we analyzed the sources and influencing factors of the spring flow as well as the characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes and its implications. The results show that the springs belong to bedrock fissure water. The flows show no obvious seasonal changes, which indicate that the flow may be affected by the aeration zone, water hold capacity of soil, catchment area and altitude. The spring hydrogen and oxygen stable isotopes present a linear relationship ($\delta D = 5.7439\delta^{18}O - 10.6535$), without seasonal variations. This suggests that spring is supplied mainly by the precipitation, and affected by the strong evaporation. There is a significantly linear relationship between the altitude of the spring and $\delta^{18}O$. Similarly, δD values show a linear relationship with the altitude, while the correlation is not statistically significant. The results show that the hydrological processes in the Hasi Mountain eco-hydrology of forest in the semi-arid region is very complicated.

Key words: Hasi Mountain; arid and semi-arid area; spring flow; stable isotopes