

冰雪消融的同位素效应及氘过量参数演化 ——以四川稻城水体同位素为例

尹 观¹⁾ 倪师军¹⁾ 范 晓²⁾ 吴 昊²⁾

(1)成都理工大学 四川 成都 610059 2)四川省地质矿产局区域地质调查队 四川 成都 610213)

摘 要 水体同位素组成的变化实际上是依存于环境变化的一种综合性反应。不同季节高原高山冰雪的消融,可以明显地影响地表径流和浅层地下水的同位素组成及氘过量参数的变化。了解这一特有的自然背景所引起的同位素分馏现象,探索其形成过程及演化机理,对于评价一个地区环境、气候及水资源的关系,其重要性是不言而喻的。本文以四川稻城地表径流和温泉水的同位素组成为例,主要介绍了不同季节高原高山冰雪消融背景条件下地表径流和温泉水同位素组成及氘过量参数变化规律,结合当地的自然背景及气候条件,着重分析讨论了冰雪消融过程中的同位素效应及氘过量参数演化过程及原因。

关键词 同位素分馏效应 氘过量参数演化 高山冰雪消融 四川稻城

Isotopic Effect and the Deuterium Excess Parameter Evolution in Ice and Snow Melting Process :A Case Study of Isotopes in the Water Body of Daocheng Sichuan Province

YIN Guan¹⁾ NI Shijun¹⁾ FAN Xiao²⁾ WU Hao²⁾

(1)Chengdu University of Technology ,Chengdu ,Sichuan ,610059 ;

2)Regional Geological Survey ,Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources ,Chengdu ,Sichuan ,610213)

Abstract The variation of water isotope composition is actually an integrated reaction depending on the change of environment. The ice and snow melt of different seasons in high mountains can obviously affect the variation in isotope composition and deuterium excess parameters of surface flow and shallow groundwater. The knowledge of the isotopic fractionation caused by this special natural background and the exploration of its formation and evolution are extremely important in estimating the relationship between the environment, climate and water resources in a certain area. With the isotope composition of surface flow and shallow groundwater in Daocheng of Sichuan as an example, this paper deals mainly with the variation regularity of the isotope composition and the deuterium excess parameters of surface flow and hot-spring under the condition of ice and snow melt in high mountains during different seasons. The isotope effect and the deuterium excess parameter evolution in the process of ice and snow melting are also discussed in detail.

Key words isotopic fractionation effect evolution of deuterium excess parameter ice and snow melt in high mountain Daocheng in Sichuan

稻城县位于四川省西部,青藏高原东南缘,横断山脉东侧,隶属甘孜藏族自治州。地理位置为 N27°58′~29°42′,E99°58′~100°38′,面积 7 323 km²,全县平均海拔 3 500 m 以上。境内地形复杂,北高南低、西高东低,最高点为南部的贡嘎雪山仙乃日峰,海拔 6 032 m。海拔 4 500 m 以上的山峰上可见终

年积雪和现代冰川。

受青藏高原复杂地形的影响,该区呈现青藏高原型气候和大陆性气候特征,属大陆性季风高原型气候。因海拔较高,气温比同纬度的中国东部各地都低,但日照辐射强。历年平均降水量为 636 mm,最多年降水量为 901.4 mm,最少为 436.6 mm;历

本文为四川省计经委项目资助的成果。

责任编辑:宫月萱。

第一作者:尹观,数据 42 年生,教授,博士生导师,主要从事同位素地球化学研究。

年月平均降水量最少是 1 月份(0.7 mm),最多是 7 月份(187.2 mm)。年平均蒸发量为 1 844.7 mm , 全年蒸发量大于降水量。全县水系纵横,三大河流(即稻城河、赤土河和东义河)均属金沙江水系。地表水和地下水的补给来自高山雪融水和降雨。这样的自然背景及气候条件为研究冰雪溶融过程中的同位素效应及氘过量参数演化提供了可能。

结合当地的地热资源调查,研究中分季节采集了各种水体样品(图 1),分别作了 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 T (氦含量)测定,并按 Dansgaard 定义计算出 d 值(表 1 ; 王恒纯,1991 ;尹观等 2001a 2001b)。

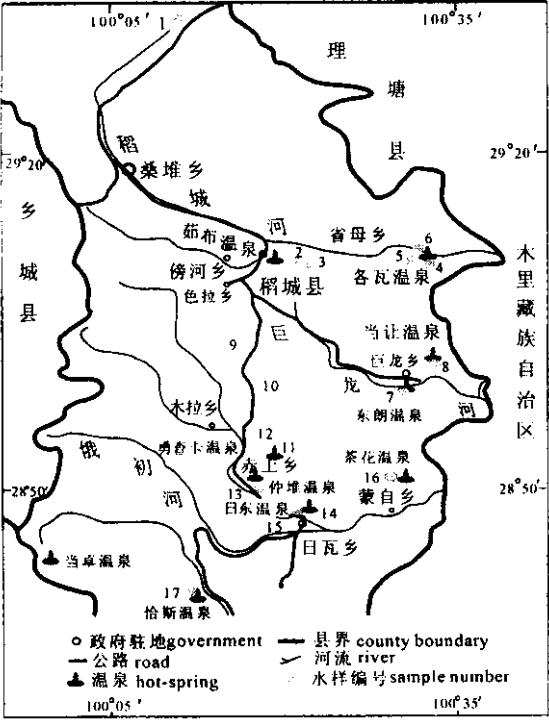


图 1 稻城各水体采样位置图

Fig.1 Sampling location of water bodies in Daocheng

各水体的 δD 、 $\delta^{18}O$ 和 d 、 T 值有以下特点:①区内水体的同位素组成在以下范围内变化: δD 变化范围为 $-131.2\text{‰} \sim -162.1\text{‰}$,绝大多数集中在 $-140\text{‰} \sim -155\text{‰}$ 之间; $\delta^{18}O$ 变化范围为 $-22.79\text{‰} \sim -17.37\text{‰}$,主要集中在 -20‰ 附近,反映了高原高山的气候特点;②水体的 H_2O 同位素组成季节性变化明显,夏季低,冬季高,与正常大气降水的规律相悖,存在明显的反季节性效应;③氘过量参数值(d)为 0.54~24.56;氦含量(T)为 5~37.4 TU,各采样点水的氘过量参数值(d)和氦含量(T)随季节不同而呈正相关变化,其主要趋势是夏季低,

冬季高。

水体同位素组成的这种变化实际上是由环境变化引起的一种综合性反应(Petil 等,1991 ;Schotterer 等,1993 ;White,1995 ;Machavaram 等,1995 ;Heffmam 等,1998)。该区地处雪域高原,高山终年积雪,现代冰川常见于山巅。冬季高山冰雪封冻,地表径流和温泉的补给以浅层存贮地下水为主;夏季部分冰雪溶融,导致地表径流和温泉以雪融水占绝对优势。在夏季,山峰上的冰川和积雪经过部分溶融的同位素分馏过程,使其雪融水的同位素组成贫化和含氦量甚少。这样的同位素效应是导致当地水体的同位素组成与大气降水呈反季节性变化的根本原因。

冰雪部分溶融过程中的同位素分馏已有实验证实(尹观等,1998),Moser(1980)依据融雪量占总雪量的份数对应于雪融水的 δD 实验,揭示出部分冰雪溶融过程中存在明显的同位素分馏,雪融水中明显富轻同位素组成,且其相对融雪量与雪融水的同位素组成之间呈正相关变化。冰雪部分溶融过程中的同位素效应主要表现为动力同位素分馏,实际上与环境温度有关。一般说来,同位素的分馏效应与分子的平动能、转动能和振动能有关,但与温度有关的同位素分馏作用却只取决于分子的振动能,振动能的大小与分子键的强弱密切相关。由轻同位素构成的水分子,质量较轻,比重同位素水分子具有较大的振动能,其所形成的氢键较弱,因而沸点低,蒸汽压较大,当水体吸收热量时,它们之间的氢键比重同位素分子易破坏,优先进入蒸汽相。因而,控制地表水同位素分馏的主要因素是同位素水分子之间氢键的强弱。自然界水体中有 9 种不同的稳定同位素水分子($H_2^{16}O$ 、 $H_2^{17}O$ 、 $H_2^{18}O$ 、 $HD^{16}O$ 、 $HD^{17}O$ 、 $HD^{18}O$ 、 $D_2^{16}O$ 、 $D_2^{17}O$ 、 $D_2^{18}O$),它们之间存在固定的质量差,其不同同位素水分子组成的氢键力也有明显的差异。水体中由 $H_2^{16}O$ 组成的同位素水分子的氢键,键力最弱, $D_2^{18}O$ 组成的氢键键力最强。在常温条件下,部分冰雪溶融过程中,由 $H_2^{16}O$ 分子构成的氢键最容易受到破坏,在溶融的液相中优先富集质量数最轻的同位素($H_2^{16}O$)水分子,故而冰雪的部分溶融可以导致明显的动力同位素分馏。其分馏程度的大小与温度有关。在不同温度条件下,由部分固相转变为液相的过程中,各种 H 、 D 和 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O 组成的同位素水分子在液相中数量的富集程度存在差

表 1 稻城地区各水体的同位素组成

Table 1 Isotope composition of the several water bodies in Daocheng

编号	样品名称	h/m	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$	T/TU	采样时间/年.月
1	海子山地表水	4560	-151.4	-19.90	7.8	5	2001.08
2	茹布温泉	3760	-160.3	-21.98	15.54	10	2001.08
			-145.6	-20.78	20.64	19.2	2001.11
3	茹布温泉地表水	3760	-145.6	-18.70	4	13	2001.08
			-133.5	-17.58	7.14	12.1	2001.11
4	各瓦温泉	3700	-156.8	-21.37	14.16	5	2001.08
			-137.2	-20.22	24.56	24.3	2001.11
5	各瓦温泉地表水	3710	-126.6	-16.60	6.2	7	2001.08
6	各瓦村河水	3610	-146.1	-18.45	1.5	8	2001.08
			-140.9	-17.68	0.54	18.3	2001.11
7	东朗温泉	3210	-154.3	-20.69	11.22	5	2001.08
			-147.9	-20.04	12.42	37.4	2001.11
8	当让温泉	3410	-155.6	-20.12	5.36	5	2001.08
			-140.1	-18.95	11.5	26.3	2001.11
9	波瓦山北坡地表水	4200	-142.1	-19.05	10.3	13	2001.08
10	波瓦山南坡地表水	4080	-140.9	-18.72	8.86	10	2001.08
11	勇查卡温泉	3730	-158.7	-21.53	13.54	6	2001.08
			-154.9	-21.72	18.86	35.4	2001.11
12	勇查卡温泉地表水	3680	-155.6	-20.61	9.28	7	2001.08
13	仲堆温泉	3210	-142.7	-19.02	9.46	10.1	2001.11
14	日东温泉	3050	-162.1	-22.79	20.22	12	2001.08
			-132.4	-17.57	8.16	25.2	2001.11
15	日东温泉地表水	3030	-144.5	-17.37	-5.54	7	2001.08
			-141.0	-18.45	6.6	32.3	2001.11
16	茶花温泉	3640	-142.1	-19.40	13.10	9	2001.08
17	恰斯温泉	2790	-131.2	-17.73	10.64	28.3	2001.11

注 :分析者为 中国地质大学测试中心 ,黄俊华 (实验方法为 CO_2 平衡法(O 同位素)、金属铀还原法(H 同位素)、测量仪器 :MAT251 ,精度 δD 为 $\pm 0.01\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}$ 为 $\pm 0.002\text{‰}$; T 为 $\pm 0.5\text{ TU}$)

异 造成其组成的比例很不一致。在冰雪的部分溶融过程中 ,低温条件下的 H_2O 同位素分馏最大 ,随着温度的升高 ,溶解速度加快 ,其分馏程度逐步降低。氘过量参数值(d) 在水的不同相变过程中的变化 ,实质上与不同环境温度条件下的溶解速度所产生的同位素分馏程度有关。因此 ,氘过量参数值(d) 有可能成为冰雪部分溶融过程中溶融速度的一个有意义的相对量度值。 d 值低 ,表明冰雪溶融速

度快 ,相对融雪量大 ; d 值高 ,表明溶融速度慢 ,相对融雪量小。

由氘组成的水分子之间的氢键结合力最强 ,在自然界的温度条件下 ,部分冰雪溶融过程中 ,它们之间组成的氢键被破坏的几率甚低 ,故而在冰雪溶融水内一般贫氘。

实际上 ,自然界的情况要复杂得多 ,在不同地域、不同地段内 ,径流和浅层地下含水层所接收冰雪

溶融水在数量上也存在着差异,导致其氘过量参数值(d)和氦含量的不同。夏季 d 和 T 明显变低,意味着夏季温度高,融雪水在地表径流和温泉中占优势。不同采样点水的 d 和 T 值的差异,更大程度上取决于融雪水和浅层地下水的混合比。冬季则相反,冰雪部分溶融的影响降至最低。

此外,夏季地表径流和温泉水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 相对低,其原因为:①高山雪本身的同位素组成就很低;②雪降落以后又经历了部分融溶的同位素分馏过程,溶融水的同位素组成进一步贫化。二者迭加,使得夏季地表径流和温泉水的 δD 、 $\delta^{18}O$ 变得比冬季水还低。另一方面,夏季地表径流和温泉水的 d 和 T 值明显比冬季低,说明夏季高山气温相对升高,冰和雪的溶融速度加快,在地表径流和温泉水中冰和雪溶融水的相对比例大大增高,其同位素组成显示出高山冰雪溶融水的特点。冬季则相反,高山冰雪溶融水显著减少,当地地下水的比例相对增加,径流和温泉水主要反映了当地地下水的特征,水相对富重同位素。

致谢 参加此次工作的还有杨俊义、王茜、杨更、冉杰等,在此一并致谢。

参 考 文 献

王恒纯. 1991. 同位素水文地质概论. 北京:地质出版社,48~49.
尹观. 1988. 同位素水文地球化学. 成都:成都科技大学出版社,104~121,192~193.
尹观,倪师军. 2001a. 地下水氘过量参数的演化. 矿物岩石地球化学通报,10(4):487~494.
尹观,倪师军,张其春. 2001b. 氘过量参数及其水文地质学意义. 成都理工学院学报,28(3):251~254.

References

Petit J R, White J W C, Young N W et al. 1991. Deuterium excess in Recent Antarctic snow. *Journal of Geophysical Research*, D, Atmospheres, 96(3):5113~5122.
Schotterer U, Froehlich K, Stichler W et al. 1993. Temporal variation of (super 18) O and deuterium excess in precipitation, river and spring waters in Alpine regions of Switzerland. *Proceedings Series-International Atomic Energy Agency*, Vienna, 53~64.
White James W C. 1995. Deuterium excess from the GISP2 ice core, potential for correcting paleotemperatures from isotopes in ice cores for source water temperature changes. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 76(17):177.
Machavaram Madhav V, Krishnamurthy R V. 1995. Earth surface vaporative process; a case study from the Great Lakes region of the United States based on deuterium excess in precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20):4279~4283.
Hoffmann G, Stievenaard M, Jouzel J et al. 1998. Deuterium excess record from central Greenland; modelling and observations. *Proceedings Series-International Atomic Energy Agency*, Vienna, International, 591~602.
Wang Hengchun. 1991. General theory of isotope hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House, 48~49 (in Chinese).
Yin Guan. 1988. Isotope hydrologic geochemistry. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 104~121, 192~193.
Yin Guan, Ni Shijun. 2001. Evolution of deuterium excess(d -excess) parameter of groundwater. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 10(4):487~494 (in Chinese with English abstract).
Yin Guan, Ni Shijun, Zhang Qichun. 2001b. Deuterium excess(d -excess) parameter and its hydrogeology significance. *Journal of Chengdu University of Technology*, 28(3):251~254 (in Chinese with English abstract).