

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.02.003

长白山矿泉水补给径流与排泄关系

张文卿¹, 王文凤², 刘淑芹³, 陈建生²

(1. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021;
2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 3. 吉林大学测试中心, 吉林 长春 130021)

摘要: 为研究长白山地区广泛分布的偏硅酸盐型矿泉水的补给源, 通过氢氧同位素与水化学分析, 结合水文地质、地球物理等资料, 确定长白山泉水接受来自于西藏羌塘盆地的外源水补给。长白山泉水 TDS 很低但富含偏硅酸的现象表明, 地下水流经的含水层是由硅酸盐等火山岩组成, 结合长白山地区火山玄武岩大量的喷发事实, 推断地下水导水通道由孔洞玄武岩构成。指出应加强对西藏冰川、河流与湖泊的保护, 从而确保长白山优质矿泉水能够持续地开发利用。

关键词: 长白山; 矿泉水; 偏硅酸; 氢氧同位素; 补给源

中图分类号: TV211.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2019)02-0108-06

Relationship of recharge runoff and drainage for the mineral water in the Changbai Mountain

ZHANG Wenqing¹, WANG Wenfeng², LIU Shuqin³, CHEN Jiansheng²

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: In order to study the supply source of widely distributed metasilicate type mineral water in the Changbai Mountain area, based on the information of hydrogeology and geophysics, the water supply of the Changbai Mountain springs from the Qiangtang Basin in Tibet was determined, through the hydrogen and oxygen isotope analysis as well as the water chemical analysis. TDS of the Changbai Mountain spring water is low, but with rich metasilicate, and this phenomenon indicates that the aquifer that water flows through is composed of silicate volcanic rock. Combined with the massive eruption of volcanic basalt in the area of Changbai Mountain, it can be concluded that the groundwater channel is composed of pore basalt. Therefore, the protection of Tibetan glaciers, rivers and lakes should be strengthened to ensure the sustainable development and utilization of high-quality mineral water in the area of Changbai Mountain.

Key words: Changbai Mountain; mineral water; metasilicate; hydrogen and oxygen isotope; supply source

长白山具有极为丰富的矿泉水资源, 与阿尔卑斯、高加索并列为世界三大矿泉水产地。目前开采的长白山矿泉水均来自于自涌泉, 国土资源与水利部门划出了矿泉水保护区, 但保护区的划分可能并不符合实际情况^[1], 真正的补给源区可能并没有得到恰当的保护。目前, 主要观点认为长白山矿泉水接受当地降水补给, 对于这一观点, 笔者认为存在以下问题: (a) 长白山泉水从海拔 2 200 m 的天池到松嫩平原都有分布, 德国弗

基金项目: 国家自然科学基金(51578212); 吉林省水利厅原始创新项目(2130331)

作者简介: 张文卿(1964—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事地下水资源研究。E-mail: zhangwenqing1966@yahoo.co.jp

通信作者: 陈建生, 教授。E-mail: jschen@hhu.edu.cn

引用本文: 张文卿, 王文凤, 刘淑芹, 等. 长白山矿泉水补给径流与排泄关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 108-113.

ZHANG Wenqing, WANG Wenfeng, LIU Shuqin, et al. Relationship of recharge runoff and drainage for the mineral water in the Changbai Mountain[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(2): 108-113.

莱森研究所对长白山 10 个代表性水源地进行长达 10 a 的连续观测,测得的矿泉水年龄约为 50 a^[2];如果当地降水补给地下水,通过泉水口快速排出部分的泉水年龄应在 0 ~ 50 a 之间。(b)长白山含水层由第四系玄武岩和火山熔渣层组成,气孔发育,玄武岩气孔率一般达 20% ~ 30%,气孔内无充填,水平方向连通好,构造裂隙和成岩裂隙发育,裂隙将气孔上下左右沟通,形成纵横交错的网络空间和通道^[3],这种玄武岩孔洞导水介质是一种强透水构造,含水层的连通性很好。(c)研究发现,在长白山天池瀑布中有 65% 的水量来自于地下水,水量平衡关系证实,长白山地区的径流量与蒸发量之和远大于降水量,同时,根据同位素分析推测长白山泉水可能来自于西藏羌塘盆地的冰川融水^[4]。

综上,笔者通过详细的同位素与水化学分析,讨论长白山矿泉水的补给、径流与排泄机制,结合水文地质、降水同位素、地球物理等资料,确定长白山矿泉水真正的补给源区。

1 长白山地区水文地质概述

长白山地区位于中国东北部的吉林省境内,东南部以鸭绿江为界,与朝鲜相望,包括白山、通化和延边的部分地区,面积约 27 000 km²,其中长白山自然保护区面积为 1 964.65 km²,降水主要来自于夏季风与冬季风。长白山是三江(松花江、鸭绿江和图们江)之源,水系呈放射状展布,水资源极其丰富,且多以泉群形式出露,流量稳定。除峡谷泉等泉水的流量相对较小以外,其余矿泉的流量都很大。长白山年降水量变化在 489.28 ~ 825.26 mm^[5]。松花江、鸭绿江与图们江都发源于长白山天池、望天鹅等火山口(图 1),河水的稳定补给源来自于泉水。目前长白山矿泉水的开采集中在靖宇、抚松与安图地区。实际上,从长白山发源的松花江、鸭绿江与图们江都属于矿泉水资源,水中的偏硅酸都大于 25 mg/L。

长白山矿泉水主要集中在玄武岩地区,流量大于 200 m³/d 的泉眼约有 100 处,总流量达 24×10⁴ m³/d;流量大于 10 000 m³/d 的泉眼有 6 处,总量达 12.96×10⁴ m³/d。低矿化度偏硅酸、锂、锶复合型矿泉水分布在长白朝鲜族自治县十八道沟。高矿化度碳酸、偏硅酸、锂、锶复合型矿泉水分布在抚松碱场沟、松山和安图二道白河等地^[6]。

长白山矿泉水的形成与地层结构及矿物成分有关。长白山地区地层出露较齐全,包括从古生代至新生代地层,且层序较齐。二叠纪以前的地层岩性以变质岩为主,包括石英岩、大理岩等,二叠纪以后至中生代地层以碎屑岩为主,自新生代第三纪以来,火山活动强烈,以大规模、多旋回基性岩浆喷溢为主,形成大面积玄武岩盖层,几乎遍布全区^[7]。大型断裂构成了网络状断裂构造系统,断裂构造网络与玄武岩孔洞相互连通并广泛发育,为长白山矿泉水的形成提供了深循环通道^[3]。

2 长白山富偏硅酸矿泉水的形成机制

长白山是火山活动与玄武岩喷发形成的,地下水在玄武岩孔隙与断裂构造中流动。硅酸是在水岩反应条件下形成的,漫长的运移过程中,地下水经过熔岩中断裂和裂隙的热力流以及高压环境的作用,水中的 CO₂ 与玄武岩孔隙中的岩石发生水岩反应,不断溶滤熔岩中的矿物和化学成分,使地下水获得多种微量元素,特别是 SiO₂,从而形成了硅酸矿泉水^[3]。

长白山新生代火山活动强烈,火山岩分布广泛。岩性以致密块状橄榄玄武岩、气孔状玄武岩、粗面岩、粗面安山岩和碱流质浮岩类为主。玄武岩中非晶质 SiO₂ 丰度较高,达 45.36% ~ 55.10%,而粗面岩、粗面安山岩和碱流质浮岩类中 SiO₂ 丰度高达 55.25% ~ 73.67%。遇地下水后,岩石中部分非晶质 SiO₂ 组分发生溶解,以偏硅酸的形式存在并富集于水中^[6]。

室内试验结果表明,地下水中偏硅酸的溶解量与温度、压强、CO₂ 及酸碱环境等因素呈正相关^[8]。由于水岩反应必须有 CO₂ 的参与,CO₂ 与各矿物的反应存在较大差异,最先溶出的是可溶性盐,如 Na⁺、K⁺ 等,其次是碳酸盐,如 CaCO₃ 等,然后才是 SiO₂。因为 CaCO₃ 与 CO₂ 的反应速率远远大于 SiO₂,溶解在水中的 CO₂ 主要与碳酸盐发生反应并被消耗掉。只有岩石矿物中不含碳酸盐或碳酸盐被完全溶解, SiO₂ 才可能被大量溶出。长白山泉水中的 TDS 很低,一般在 50 ~ 200 mg/L 之间,偏硅酸的质量分数在 22.5% ~ 58.0% 之间,而 Ca²⁺ 的质量分数仅在 3.0% ~ 9.9% 之间(表 1)。

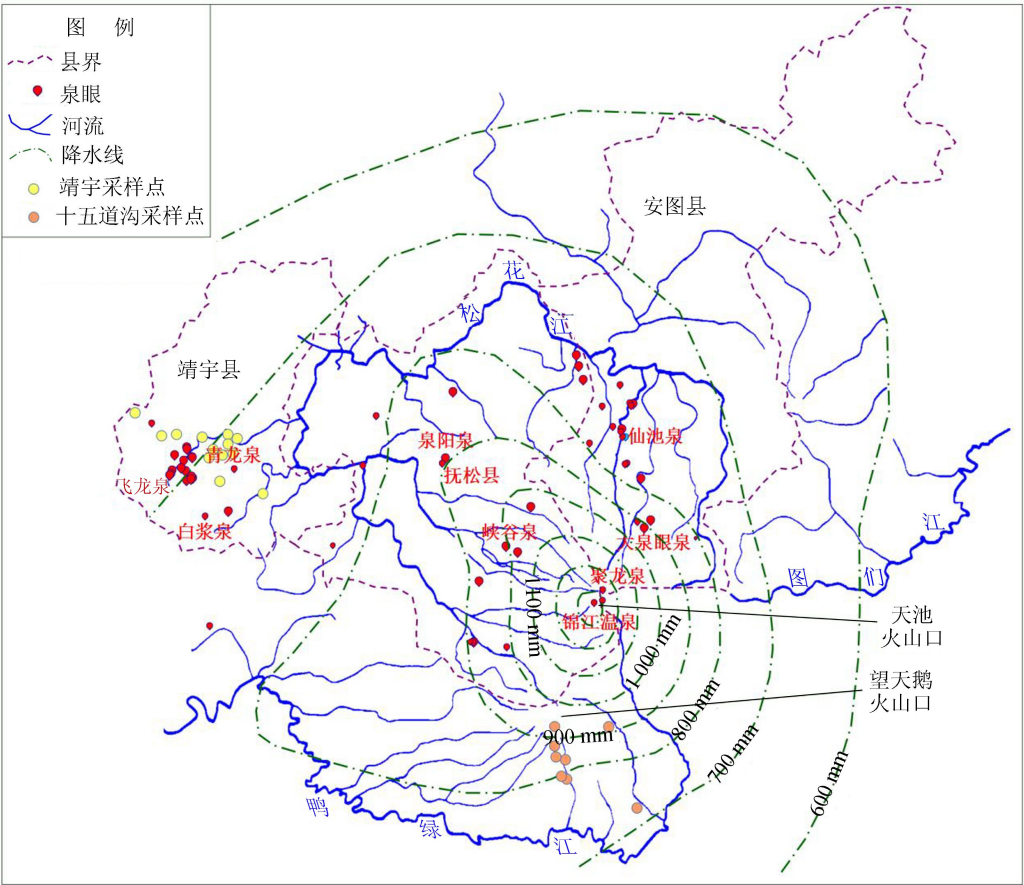


图 1 长白山泉眼与采样点分布

Fig.1 Distribution of spring water and sampling points in the Changbai Mountain

表 1 长白山泉水主要离子的质量浓度和质量分数

Table 1 Mass concentration and mass faction of main ion in the spring water of Changbai Mountain

泉 名	质量浓度/(mg · L ⁻¹)							质量分数/%						
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ₂ SiO ₃	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ₂ SiO ₃	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
峡谷泉	2.1	5.1	7.2	2.1	50.0	3.0	29.0	2.0	4.9	6.9	2.0	48.2	2.9	28.0
飞龙泉	3.3	7.8	12.2	9.8	44.5	7.2	98.0	1.7	4.1	6.3	5.1	23.1	3.7	50.9
仙池泉	2.9	9.6	4.5	4.3	63.9	2.9	56.0	1.9	6.3	3.0	2.8	42.1	1.9	36.9
大泉眼泉	2.9	9.6	4.5	4.3	63.9	2.9	56.0	1.9	6.3	3.0	2.8	42.1	1.9	36.9
青龙泉	3.7	8.2	10.5	8.6	38.9	7.0	87.0	2.1	4.8	6.1	5.0	22.5	4.1	50.4
泉阳泉	1.4	3.6	5.2	2.1	30.6	4.3	2.9	2.7	6.8	9.9	4.0	58.0	8.2	5.5
白浆泉	2.2	5.8	9.1	5.9	36.1	12.0	56.0	1.6	4.3	6.8	4.4	27.0	9.0	41.9

由表 1 可知,泉水中富含偏硅酸,表明地下水流经的岩石属于火山玄武岩,基本上不含沉积岩。因为沉积岩中含有大量的碳酸盐,碳酸盐更容易与 CO₂ 发生反应,而 SiO₂ 与 CO₂ 的反应时间比碳酸盐要长很多。这就是说,长白山地下水基本都是在熔岩孔洞与裂隙形成的网络孔洞裂隙之中,而且经历了 40 ~ 50 a 的时间。

3 长白山泉水氢氧同位素分析

新生代以来火山喷发形成了长白山,最后一次大规模的火山玄武岩喷发发生在 1702 年^[9],火山喷发结束后火山口形成了天池,天池面积 9.6 km²,平均深度 200 m,最深达到 350 m。水量平衡研究证实,天池水接受外源地下水的补给。由于水的密度在 4 ℃ 时最大,所以北方湖泊湖底温度都是 4 ℃,但是,经寒冷季节调查发现,天池天文峰下有长 200 m、宽 20 m 的不冻水面,朝鲜峰西北部深入池中的岩石下也有一处不冻水面,水温达 10 ℃ 左右,湖底有气泡冒出,据此推测这是地下水的补给通道^[10]。从天池溢出的水形成了长白山瀑布,天池瀑布是松花江的源头。江巧宁等^[4]通过水量平衡计算发现,天池及周边流域的降水量与排泄量出现了较大的不平衡,排泄量大于降水量,外源水对天池及周边地区 2.2 km² 的年补给量达到 23 亿 m³。

由于天池水位高程为 2 189.7 m,补给天池的地下水必须同时满足 3 个条件:(a) 补给源区的高程必须大于天池水位;(b) 补给源区的河流与湖泊存在明显渗漏;(c) 补给源区的降水同位素与天池泉水相同或相似。通过研究发现,只有西藏羌塘盆地能够同时满足上述 3 个基本条件:(a) 西藏内流区平均高程高于 5 000 m,符合水力学高程要求;(b) 水量平衡关系证实,西藏河流存在渗漏,西藏内流区的纳木错湖渗漏量在 120 ~ 190 m³/s 之间^[11];(c) 长白山天池及附近的泉水与河流的氢氧同位素比当地降水的加权平均值贫化,而与西藏羌塘盆地的泉水相同或相似(图 2)^[12]。长白山矿泉水氢氧同位素基本上分布在相同的区域,与当地降水存在明显的差异(图 2)。抚松矿泉水的氢氧同位素^[13]比靖宇矿泉水更加贫化。长白山十五道沟泉水的氢氧同位素关系点与抚松落在相同的范围内,比当地降水同位素贫化,表明这 2 个地区的泉水接受外源水补给。长白山十五道沟与抚松地区泉水的氢氧同位素关系点与羌塘盆地的泉水落在相同或相似的地区。羌塘盆地满足长白山外源水的补给条件,这表明羌塘盆地可能是长白山泉水的补给源区。靖宇泉水的氢氧同位素关系点与抚松、十五道沟的泉水存在明显差异,落在长白山泉水与当地降水之间,参见图 2。由此推断,靖宇的泉水中可能混入了一些当地的降水,是外源水与当地降水的混合。当地降水混入泉水后对地下水氡定年产生一些不利影响,年龄小于 40 a 的泉水可能受到降水的影响^[13]。

4 长白山泉水的补给、径流与排泄关系讨论

长白山的降水量远远低于南方地区,然而在降水量大于 1 000 mm/a 的南方地区也很少有这么多的泉水资源。迄今为止,长白山泉水的补给、径流与排泄关系仍然是不清楚的,其原因可归结为以下 3 点。

- a. 长白山矿泉水从最高的天池到丘陵地区都有广泛分布(图 1),矿泉水保护区内有泉水溢出,出现了“补给源”与“排泄区”共存的现象,这与地下水运动的基本规律相违背,因为,降水入渗到地层后,要经过地下径流向下游流动,最终以泉的形式向地表排泄,参见图 3。
- b. 很多学者都对长白山泉水进行年龄测定。陈建生等^[12]根据氡分析结果发现,长白山天池泉水年龄大约为 40 a;德国弗莱森研究所测定长白山矿泉水形成年龄为 50 a 左右^[2];高月^[13]通过氡测定的泉水年龄大概在 30 ~ 50 a 之间;张兵等^[14]通过氡与氟利昂(CFC)对三江平原浅层地下水年龄进行测定,氡测定的年龄范围是 39 ~ 51 a, CFC-12 浓度测定的年龄范围是 38.2 ~ 61.7 a。

如果泉水的补给源是当地降水,那么应该测定到年龄在 0 ~ 40 a 间任一时期的泉水,因为玄武岩孔洞、孔隙裂隙发育,降水完全可以通过浅层循环形式排泄,没有充分的时间与石英矿物反应形成大量的偏硅酸^[15]。

- c. 长白山河水除汛期之外,稳定补给量都来自于泉水补给,所以在长白山发源的松花江、鸭绿江与图们江的主要补给源也来自于泉水。泉水年龄大于 40 a,如果长白山泉水是由当地降水入渗补给,降水入渗形成地下径流在含水层中运动了很长时间,在此期间发生水岩反应,形成偏硅酸等矿泉水。那么地下水的径流路径在哪里? 储存空间又在哪里? 地下水在透水性极强的玄武岩孔洞、孔隙组成的含水层中为什么不出溢,补给、径流与排泄机制是怎样的?

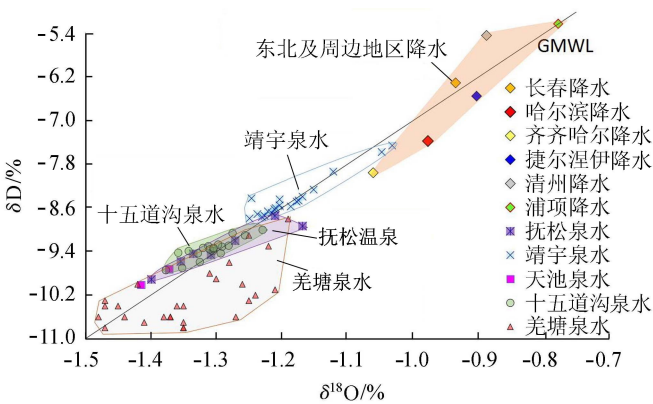


图 2 长白山泉水、降水与羌塘泉水的氢氧同位素关系曲线
Fig. 2 Hydrogen and oxygen isotopes of the Changbai Mountain spring, precipitation and the Qiangtang spring

长白山十五道沟与抚松地区泉水的氢氧同位素关系点与羌塘盆地的泉水落在相同或相似的地区。羌塘盆地满足长白山外源水的补给条件,这表明羌塘盆地可能是长白山泉水的补给源区。靖宇泉水的氢氧同位素关系点与抚松、十五道沟的泉水存在明显差异,落在长白山泉水与当地降水之间,参见图 2。由此推断,靖宇的泉水中可能混入了一些当地的降水,是外源水与当地降水的混合。当地降水混入泉水后对地下水氡定年产生一些不利影响,年龄小于 40 a 的泉水可能受到降水的影响^[13]。

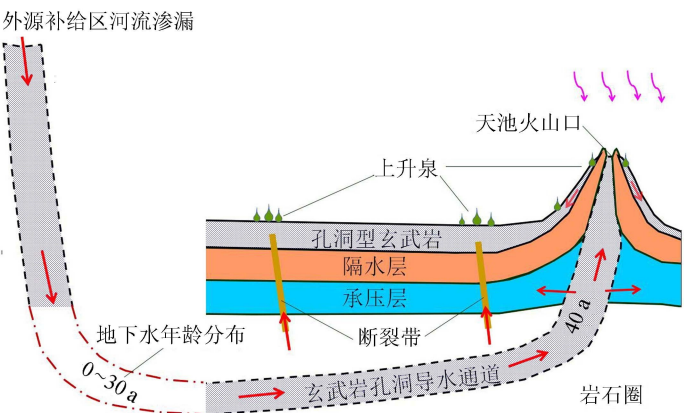


图 3 长白山天池地下水的补给、径流与排泄过程示意图
Fig. 3 Diagram of the groundwater recharge, the runoff and the discharge in the Tianchi of Changbai Mountain

经上述讨论可知,长白山泉水的补给、径流与排泄机制必须满足图3所示的地下水循环基本规律,在图3概念模型中,补给源区与排泄区的定义很明确,长白山泉水不可能来自于当地的降水补给,这个结论与江巧宁等^[4]做出的结论相同。

中国北方地区地下水同位素与当地降水存在较大差异,在黄土与沙漠地区进行的降水入渗试验结果表明,干旱地区的降水不能入渗到地下水中,地下水接受外源水补给^[16-17],深循环地下水通过基底断裂带上涌到鄂尔多斯高原,分水岭与基底断裂带高度吻合^[18-19],地下水维系了黄土高原风尘颗粒的连续堆积,从而形成了红土与黄土高原^[20-21]。中国北方地区地下水的年龄分布自西向东逐渐增大,鄂尔多斯大约20 a,华北平原大约30 a,东北平原大约40 a,地下水符合自西向东流动的特征。

通过对比图3给出的地下水补给、径流与排泄示意图,可以看出,长白山泉水符合补给、径流与排泄规律,长白山泉水中0~39 a间的地下水在径流旅途中,0 a的水在青藏高原,20 a后流到鄂尔多斯,30 a后流到华北平原,40 a后流到东北地区。即长白山是深循环地下水的排泄区而不是补给区。虽然目前对地下水深循环的机制尚不是十分清楚,但深循环现象是客观存在的,否则无法解释为什么在降水量不是很大的长白山地区会形成如此丰富的矿泉水资源。所以,应该开展对西藏补给源区的河流湖泊渗漏调查,并建立相应的自然保护区。

1984年中华人民共和国地质矿产部水文地质工程地质司在全国范围内开展了玄武岩地下水研究,经过3 a研究对我国新生代玄武岩地下水有了进一步认识,玄武岩地下水是一种新类型的地下水——熔岩裂隙孔洞水,不属于孔隙水、裂隙水与岩溶水。新生代玄武岩地下水一般都是优质淡水,水中偏硅酸含量很高,并含有锶、锌等多种对人体有益的微量元素。新生代玄武岩中熔岩隧道、孔洞裂隙、孔隙发育。显微孔隙形状一般为近圆形至不规则形,孔洞直径0.5~3 cm,孔隙率达到15%~40%,90%以上的孔洞、孔隙与微气孔、微孔隙是相互连通的^[22]。地下水在孔洞玄武岩中的流速比渗透性最大的砂砾石层还要高出3~4个数量级。由此可见,孔洞玄武岩地下水符合长白山矿泉水的形成条件,来自西藏的冰川融水通过火山通道或断裂带进入孔洞玄武岩中,地下水中的CO₂与玄武岩中的SiO₂发生水岩反应,最终形成了偏硅酸矿泉水。

对比分析发现,抚松与靖宇地区泉水中偏硅酸平均含量均低于安图,例如抚松泉阳泉中偏硅酸平均含量(质量浓度,下同)为30.1 mg/L,靖宇白浆泉水中偏硅酸平均含量为36.1 mg/L,而安图泉水中偏硅酸的平均含量为50 mg/L,见表1。偏硅酸含量低可能与降水的混入有关,入渗降水稀释了地下水中的偏硅酸,而且对氡定年也产生了一些影响。

5 结 论

- a. 长白山矿泉水接受外源水补给,根据补给源高程、地表水渗漏与同位素关系确定,补给源区为西藏内流区的羌塘盆地,所以,应该对西藏补给源区的冰川河流进行保护。
- b. 长白山矿泉水中的偏硅酸是由地下水中的CO₂与孔洞玄武岩中的SiO₂发生水岩反应生成的,偏硅酸含量基本上达到矿泉水标准,具有极高的经济价值。
- c. 孔洞玄武岩地下水不同于孔隙水、裂隙水与岩溶水,是一种新型的地下水类型,孔洞玄武岩的渗透系数比孔隙介质的最大值高3~4个数量级,西藏高原的渗漏水输运到鄂尔多斯、华北平原与东北平原的时间分别为20 a、30 a与40 a。
- d. 长白山地区的孔洞玄武岩导水性能很好,降水入渗地下水后也通过泉水排泄,入渗降水稀释了地下水中的偏硅酸,所以,降水量较大的靖宇、抚松地区泉水中的偏硅酸小于降水量较小的安图地区。

致谢:在长白山—鸭绿江区域调查期间曾得到鸭绿江国家级自然保护管理局的郭君、周亮等的大力帮助与支持,在此鸣谢!

参考文献:

[1] 林琳. 长白山区矿泉水资源成因与开发调控的研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.

[2] 刘彦臣, 张宇石. 研析长白山天然矿泉水资源基本特征及其价值[J]. 通化师范学院学报, 2009, 30(2): 52-54. (LIU Yanchen, ZHANG Yushi. Basic features and value of natural mineral water resources in Changbai Mountain[J]. Journal of Tonghua Teachers Collese, 2009, 30(2): 52-54. (in Chinese))

- [3] 张勃夫. 长白山靖宇矿泉水矿田形成分布特征及开发战略建议[J]. 吉林地质, 2001, 20(2): 58-63. (ZHANG Bofu. The distributive characteristics of Jingyu mineral water field in the Changbaishan area, Jinlin Province and its suggestion for developmental strategy[J]. Jilin Geology, 2001, 20(2): 58-63. (in Chinese))
- [4] 江巧宁, 陈建生. 深循环地下水补给长白山天池的水量平衡分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 7-13. (JIANG Qiaoning, CHEN Jiansheng. Analysis on water balance of deep cycle groundwater supplying Tianchi Lake of Changbai Mountain [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 7-13. (in Chinese))
- [5] 杨雪, 杨东, 安丽娜, 等. 1961—2013 年吉林省气温与降水变化特征[J]. 中国农学通报, 2016, 32(29): 139-146. (YANG Xue, YANG Dong, AN Lina, et al. Variation characteristics of temperature and precipitation in Jinlin: from 1961 to 2013[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(29): 139-146. (in Chinese))
- [6] 赵清华, 谭文清, 孙春. 吉林长白山饮用天然矿泉水形成条件与资源保护[J]. 吉林地质, 2005, 24(4): 64-70. (ZHAO Qinghua, TAN Wenqing, SUN Chun. The forming condition and resource preservation of natural mineral drinking water in Changbai Mountain[J]. Jilin Geology, 2005, 24(4): 64-70. (in Chinese))
- [7] 吉林省长白山地区靖宇县和抚松县天然矿泉水调查评价报告[R]. 长春: 吉林省地质工程勘察院, 2003.
- [8] 危润初. 靖宇国家级自然保护区天然矿泉水形成机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [9] 金东淳, 崔钟燮. 长白山天池火山喷发历史文献记载的考究[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊1): 304-307. (JIN Dongchun, CUI Zhongxie. A study of eruptions in Tianchi Volcano, Changbai Mountain recorded in historical documents[J]. Geological Review, 1999, 45(Sup1): 304-307. (in Chinese))
- [10] 张兴库, 朴观熙. 长白山天池水文特性分析[J]. 水文, 1991, 11(2): 49-51. (ZHANG Xingku, PIAO Guanxi. Analysis on hydrologic characteristics of Changbaishan Tianchi[J]. Journal of China Hydrology, 1991, 11(2): 49-51. (in Chinese))
- [11] ZHOU Shiqiao, KANG Shichang, CHEN Feng, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2013, 491: 89-99.
- [12] 陈建生, 江巧宁. 地下水深循环研究进展[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 8-17. (CHEN Jiansheng, JIANG Qiaoning. Research progress of ground water deep circulation[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6): 8-17. (in Chinese))
- [13] 高月. 抚松县矿泉水补给条件与形成机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [14] 张兵, 宋献方, 张应华, 等. 基于氚和 CFCs 的三江平原浅层地下水更新能力估算[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1859-1868. (ZHANG Bing, SONG Xianfang, ZHANG Yinghua, et al. Estimation of groundwater renewal rate by tritium and chlorofluorocarbons in Sanjiang Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(11): 1859-1868. (in Chinese))
- [15] 洪昌红, 邱静, 黄本胜, 等. 补给带法在基岩裂隙水可开采量计算中的应用[J]. 水资源保护, 2013, 29(2): 58-60. (HONG Changhong, QIU Jing, HUANG Bensheng, et al. Application of recharge zone method to calculation of allowable withdrawal of bedrock fissure water[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 58-60. (in Chinese))
- [16] 陈建生, 杨光亮, 王婷, 等. 内蒙古鄂尔多斯西北土壤水流示踪实验及自流井群补给源讨论[J]. 地球学报, 2014, 39(3): 365-374. (CHEN Jiansheng, YANG Guangliang, WANG Ting, et al. Soil water flow tracer test in northwest Ordos Basin, Inner Mongolia and discussion on recharge resources of artesian wells[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 39(3): 365-374. (in Chinese))
- [17] 陈建生, 王婷, 陈茜茜, 等. 鄂尔多斯自流盆地地下水来源争议问题讨论[J]. 地质论评, 2013, 59(5): 900-908. (CHEN Jiansheng, WANG Ting, CHEN Xiqi, et al. Discussion on the origin of groundwater in the Ordos Basin[J]. Geological Review, 2013, 59(5): 900-908. (in Chinese))
- [18] CHEN Jiansheng, LIU Xiaoyan, WANG Chiyuen, et al. Isotopic constraints on the origin of groundwater in the Ordos Basin of northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(2): 505-517.
- [19] 陈建生, 陈亚飞, 谢飞, 等. 鄂尔多斯乌海地下水水位上升原因分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(3): 1-9. (CHEN Jiansheng, CHEN Yafei, XIE Fei, et al. Analysis of causes of groundwater level rise in Wuhai area of Ordos Basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3): 1-9. (in Chinese))
- [20] 陈建生, 刘震, 刘晓艳. 深循环地下水维系黄土高原风尘颗粒连续沉积[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 278-287. (CHEN Jiansheng, LIU Zhen, LIU Xiaoyan. Deep-circulation groundwater maintains continuous deposition of dusty particles in loess plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 278-287. (in Chinese))
- [21] 陈建生, 王文凤. 深循环地下水作用下红土与黄土成因研究[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 1-7. (CHEN Jiansheng, WANG Wenfeng. Study on the formation mechanism of aeolian soil of laterite and loess under the action of deep groundwater circulation[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 1-7. (in Chinese))
- [22] 韩子夜. 我国新生代玄武岩地下水资源及其开发利用[J]. 勘察科学技术, 1989(3): 26-29. (HAN Ziyue. Cenozoic basalt and its exploitation and utilization of groundwater resources in our country[J]. Site Investigation Science and Technology, 1989 (3): 26-29. (in Chinese))