

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.007

阿尔山新生代玄武岩地下水补给源及其成因分析

陈建生^{1,2},王文凤¹,马芬艳¹

(1. 河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 根据水量平衡关系和氢氧同位素分析,结合水文地质、地质构造等条件,发现阿尔山玄武岩地下水接受外源水补给,补给源区可能为青藏高原。由阿尔山河水、湖水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值可知,地下水中的锶来自玄武岩,推断地下水的导水通道为连续的玄武质导水通道,低黏性的碱性玄武质熔岩流在冷却过程中形成连续的收缩缝,最终演变为管道型导水通道;青藏高原的渗漏水经过熔岩管道快速向东部地区排泄,西部地幔岩石圈增厚可能与地下水的跨流域补给有关。

关键词: 玄武岩地下水;氢氧同位素;水量平衡;岩浆活动;导水通道;阿尔山玄武岩

中图分类号:TV211.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2021)03-0249-08

Recharge source and genesis analysis of Cenozoic basalt groundwater in Arshan

CHEN Jiansheng^{1,2}, WANG Wenfeng¹, MA Fenyan¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the water balance relationship and hydrogen and oxygen isotope analysis, combined with the hydrogeology condition and tectonic geological structure condition, it is found that the groundwater in basalts of Arshan is recharged by exogenous water, and the recharge source area may be the Tibetan Plateau. The ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio of the river and lake water in the Arshan indicates that the strontium in the groundwater comes from the basalt. It is inferred that the groundwater conduiting channel is a continuous basaltic conduit. The low-viscosity alkaline basaltic lava flows form continuous contraction joints during the cooling process, and finally evolve into a pipeline conduiting channel. The leakage water of the Tibet Plateau is rapidly drained to the eastern region through the lava pipeline and the thickening of the mantle lithosphere in the west may be related to the inter basin recharge of groundwater.

Key words: basalt groundwater; hydrogen and oxygen isotopes; water balance; magmatism; conduiting channel; basalts in Arshan

20 世纪 20 年代水文地质学家发现新生代玄武岩地区存在丰富的地下水资源,地下水在孔隙网络系统中循环,并通过火山口或火山锥体涌出地表,成为河流与湖泊稳定的补给源^[1]。20 世纪 80 年代,原地矿部水文司在全国展开了新生代玄武岩地下水调查,新生代玄武岩主要分布在黑龙江、吉林、内蒙古、海南等地区,面积达到 9.4 万 km²^[1]。几乎所有的新生代玄武岩地区都赋存着丰富的地下水资源,玄武岩地下水的导水介质为熔岩管道、孔洞裂隙,不同于孔隙、裂隙与岩溶介质,苏联学者将玄武岩地下水定义为熔岩水。熔岩水具有如下特征:(a)地下水承压自流,通过破缺的火山口或火山锥体溢出,越靠近火山口地下水越丰富;(b)地下水中矿物质丰富,硅、锶、锌、碳酸等含量高,符合硅酸型、硅酸碳酸型和硅酸锶复合型矿泉水标准;(c)地下水补给来自大气降水,地下水年龄大于 30 a;(d)火山喷发的时期越近,涌水量越大^[1]。

虽然玄武岩地下水被认为是一种新型的熔岩水,但对其补径排关系的研究仍然沿用孔隙与裂隙介质采用的流域水量平衡理论,认为玄武岩地下水来自流域内部的降水,暗示着不同流域之间的地下水不存在跨流域的补给^[2]。众所周知,喀斯特岩溶地下水可以跨流域补给,贯通的岩溶形成了地下河,盆地的地下水通过“地下河”在其他盆地溢出。研究发现,玄武岩中的熔岩隧道或管道与岩溶通道相近,已经探明的熔岩隧道

基金项目: 中央高校基本科研业务费重点支持专项(2018B48814);国家重点研发计划(518056012)

作者简介: 陈建生(1955—),男,教授,博士,主要从事地下水深循环研究。E-mail:jschen@hhu.edu.cn

引用本文: 陈建生,王文凤,马芬艳. 阿尔山新生代玄武岩地下水补给源及其成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):249-256.

CHEN Jiansheng, WANG Wenfeng, MA Fenyan. Recharge source and genesis analysis of Cenozoic basalt groundwater in Arshan [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 249-256.

长度超过 10 km。在黑龙江五大连池、镜泊湖、长白山天池、云南腾冲及海南岛北部等地区的熔岩台地中,玄武岩中的熔岩隧道也形成了“地下河”,河流通过“地下河”进行跨流域补给^[2]。玄武岩地下水的导水介质包括熔岩隧道、熔岩管道、气孔、孔隙等,虽然它们的形成与岩溶导水介质不同,但都具有管道流特征。

位于大兴安岭的阿尔山新生代以来发生了多期火山喷发,大兴安岭中部最高峰——摩天岭(1 711.8 m)是一座更新世火山。从火山锥体或火山口涌出的泉水成为哈拉哈河等河流稳定的补给源。哈拉哈河上游接受高温地下水的补给,在冬季成为不冻河,表明地下水经历了深循环过程。阿尔山火山区地下水通过玄武岩熔岩隧道与断裂带涌出地表形成冷泉和温泉,但是地表水与地下水的补给、径流与排泄过程,导水通道的成因等仍然存在诸多疑团,需要进行深入研究。本文通过水量平衡分析,结合水中的氢、氧、锶等同位素与水文地质条件,讨论阿尔山火山区玄武岩地下水导水通道与补给源问题。

1 研究区概况及采样点信息

阿尔山位于内蒙古大兴安岭腹地西南麓,总面积 7 408.7 km²,海拔在 900 ~ 1 700 m 之间,森林覆盖率达到 62%,各类湿地总面积达 379.8 km²^[3]。水资源丰富,存在众多的河流、湖泊和泉群等。阿尔山位于南蒙古兴安造山带与大兴安岭北段晚古生代增生造山带之间,属于大兴安岭中华力西褶皱带^[4]。火山活动始于中生代,新生代以来火山活动加强,岩浆喷发形成众多火山地貌^[5]。阿尔山地区由 NE 向和 NW 向断裂带控制,受 NE 走向的基底断裂带的影响,区内火山群呈 NE 向线状分布^[6]。

阿尔山属于火山熔岩地貌,拥有高位火山口湖、熔岩堰塞湖、功能性矿(温)泉群等。阿尔山火山群是中国第七大活火山群,由 46 座火山组成,火山构造单元上属大同-大兴安岭新生代火山活动带^[7]。阿尔山火山活动具有多期性,更新世火山保存较好,部分火山口成为火山口湖,主要有阿尔山天池、驼峰岭天池、地池等;火山堰塞湖主要包括松叶湖、杜鹃湖、鹿鸣湖等。从火山锥体涌出的泉水成为众多湖泊与河流的稳定补给源。阿尔山火山群与湖泊、河流的分布如图 1 所示。无论是火山口湖还是堰塞湖,湖泊水位基本保持稳定,即使在连续干旱的季节,水位也始终不变。

哈拉哈河发源于阿尔山五道沟东南山,泉水从新老两座火山锥体脚下涌出,泉水高程约 1 500 m,南北 2 座火山相距约 1.6 km,南部火山是大兴安岭中部海拔最高的山峰,山顶海拔为 1 711.8 m,被称为摩天岭。哈拉哈河在阿尔山火山区还有一条支流来自地下河,如图 1 所示。沿途还有 12 条河流汇入哈拉哈河,河流的源头为火山锥体中溢出的泉水。由于河流在冬季具有稳定的流量而且温度较高,哈拉哈河上游成为不冻河。

阿尔山地区分布着众多的矿(温)泉群,目前已发现的温泉群达 4 处,温泉 76 眼。距离阿尔山国家森林公园西部约 30 km 处分布着 1 处温泉群,泉眼温度总体上呈由南向北逐渐增加的趋势,最高水温近 50℃,可分为冷泉、温泉、热泉、高热泉 4 大类。高温的泉水表明地下水经历了深部循环加热过程。最为奇特的是冷泉、热泉共存一处,热泉温度高达 40℃,冷泉温度只有 2℃,二者相距仅 0.3 m^[8]。

1951—2015 年阿尔山地区年均降水量 450 mm,年蒸发量 720 mm,降水主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 80% ~ 90%。阿尔山地区年平均气温-3.11℃,冬季寒冷漫长,最低气温低于-40℃,每年 10 月至次年 4 月为积雪期^[9]。由于上涌的地下水温度较高,阿尔山地区没有出现多年冻土层。冬季的降水以雪的形式保留在地表,在没有降水入渗补给的情况下,火山口及火山锥体中仍然在源源不断地涌出泉水,表明泉水补给源不是大兴安岭的降水。

阿尔山地区采样点分布如图 2 所示。2015 年 7 月 24 日在研究区采集了 7 个水样,包括 4 个河水样,1 个湖泊水样,2 个天池水样。采集水样时,先用水样将瓶子清洗 2 ~ 3 遍,在水面以下 10 cm 左右顺水流方向取样,待水样充满取样瓶后,在水下密封好后拿出水面。所有样品均保存于聚乙烯瓶中,并及时运回实验室检测。

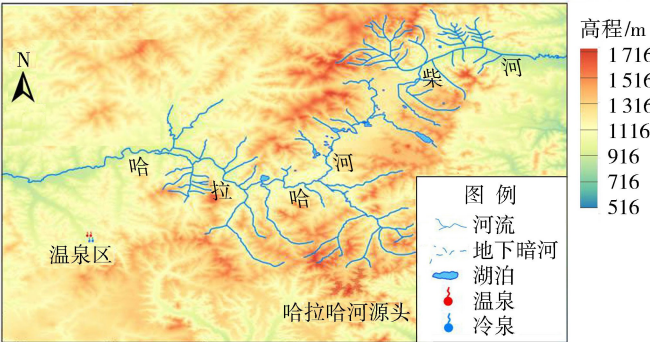


图 1 阿尔山新生代火山岩地区河流、温泉与湖泊分布
Fig.1 Distribution of rivers, hot springs, and lakes in Cenozoic volcanic rock area of Arshan

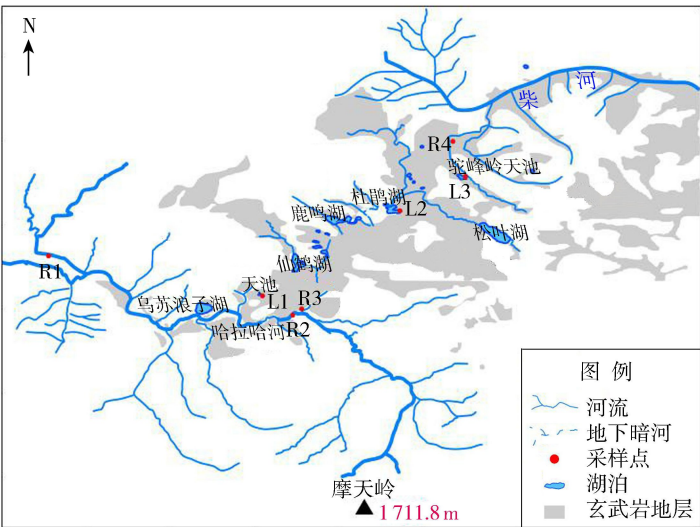


图 2 阿尔山新生代玄武岩地层和采样点分布

Fig. 2 Distribution of Cenozoic basalt strata and sampling points in Arshan

现场采样时,采用 WTW Multi3400i 便携式多功能测试仪测量水样温度、pH、TDS、电导、盐度等信息,测试误差均小于 10%,TDS 的测量误差为 1 mg/L。氢氧同位素测定在河海大学水文水资源与水利工程国家重点实验室中进行,用 MAT253 质谱仪测定了 δD 、 $\delta^{18}O$,分析精度 δD 为 $\pm 2\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $\pm 0.1\text{‰}$ 。锶同位素分析实验于南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室中进行,利用表面热电离同位素质谱仪(TIMS)测定锶同位素。

2 研究区水量平衡与同位素分析

2.1 阿尔山全新世火山岩地区水量平衡分析

阿尔山国家森林公园森林覆盖率达到 62%,分布着河流、湖泊与湿地,湿地又可分为河流湿地、草本沼泽湿地、灌丛沼泽湿地、湖泊湿地等类型。这种植被覆盖类型导致研究区具有较大的蒸散发量。MODIS 卫星数据对森林生态系统的模拟最为准确^[10],贺添等^[11]在站点尺度和流域尺度的验证结果也表明,MOD16 产品对于我国森林、农田生态系统模拟精度较高,因此本文通过 MOD16 卫星产品模拟阿尔山国家森林公园的实际蒸散发量。研究区的面积为 1031.49 km²,计算得到的蒸散发量分布,参见图 3。通过对比图 2 与图 3 可以发现,裸露的玄武岩地区的蒸散发量小,最小的蒸散发量只有 294.7 mm;草地的蒸散发量高于玄武岩地区,平均值约为 400 mm;森林覆盖区的蒸散发量最高,最大值可达到 664.3 mm。前人对内蒙古地区不同草原类型的蒸散发量进行了研究,发现这些地区的降水量空间分布在 300 ~ 500 mm 之间,模型计算得到蒸散发量的空间分布也在 300 ~ 500 mm 之间,降水量几乎等于蒸散发量^[11]。

研究区多年平均蒸散发量为 457.6 mm,多年平均降水量为 445.3 mm,是哈拉哈河的主要集水区,哈拉哈河的年流量 4.32 亿 m³。阿尔山大部分地区被原始森林覆盖,包括哈拉哈河源头在内的海拔较高的山脉的蒸散发量均大于 450 mm,最大值为 664.3 mm,降水量小于蒸散发量,意味着降水不足以满足森林生长所需水量,还应有外源地下水补给。虽然哈拉哈河部分流经地区为裸露的玄武岩地区,蒸散发量较小,降水量大于蒸散发量,可产生地表径流汇入哈拉哈河,但裸露的玄武岩区面积较小,产生的径流量不足以补给整个哈拉哈河水量。径流量与蒸散发量之和远大于降水量,研究区水量不平衡,有外源地下水补给。哈拉哈河上游长达 20 km 的一段河流在平均温度为 -22.3℃ 的冬季不结冰,被称为不冻河,表明河流冬季接受温度较高的地下水补给。因此推测,当地河流接受外源地下水的补给,且地下水经历了深循环过程。

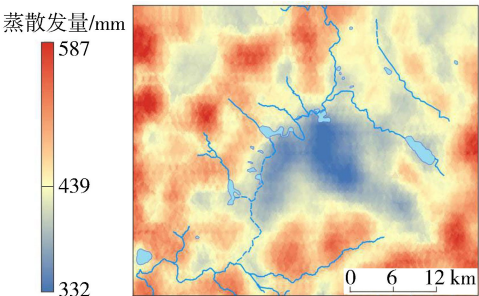


图 3 阿尔山地区蒸散发量与河流湖泊分布

Fig. 3 Distribution of evapotranspiration, rivers, and lakes in Arshan

2.2 氢氧同位素分析

研究采集了阿尔山地区哈拉哈河河水、杜鹃湖湖水及天池水,采样点的位置分布如图2所示。水样的氢氧同位素关系点见图4^[8]。部分氢氧同位素关系点沿着全球雨水线(GMWL)分布,表明其来自大气降水且受到蒸发作用很小,大部分点落在GMWL的下方,表明受到蒸发作用的影响。为了确定地下水的补给源区,图4标出了中国北方地区降水同位素的加权平均值,包括内蒙古、东北、华北等地区。降水同位素的加权平均值最贫化的地区是距离研究区最近的齐齐哈尔。

阿尔山有很多火山口湖和堰塞湖,如果湖水来自降水,湖水的同位素关系点受到蒸发作用影响应该落在蒸发线(EL)上。由表1可知,阿尔山天池与驼峰岭天池虽然都是火山口湖,但氢氧同位素差别明显,驼峰岭天池水是研究区同位素最富集的水样,受到了强烈的蒸发作用的影响,同位素关系点落在蒸发线上,而阿尔山天池水的同位素关系点靠近GMWL。所有湖泊受到的蒸发强度基本上相同,同位素差异反映出地下水补给量不同,地下水补给量所占比例越高,湖水的更新周期越短,湖水同位素关系点越靠近GMWL。阿尔山天池水位常年保持稳定,表明其接受地下水补给,在水位附近存在隐伏的溢流通道,而且湖水更新周期较短。驼峰岭天池面积与库容较大,湖水更新周期较长,所以氢氧同位素关系点落在EL上,远离GMWL。

表1 阿尔山河水与湖泊中的氢、氧、锶与pH数据

编号	水样来源	经纬度/(°)		海拔/m	$\delta D/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	pH
		东经	北纬					
L1	天池	120.4067	47.3157	1275.0	-87.1	-11.6	0.708523	6.3
L2	杜鹃湖	120.5710	47.4167	1192.0	-91.8	-12.3	0.707893	8.0
L3	驼峰天池	120.6489	47.4575	1271.0	-64.7	-6.0		7.0
R1	哈拉哈河	120.1515	47.3632	954.0	-106.0	-14.3	0.708143	7.3
R2	哈拉哈河	120.4428	47.2927	1087.8	-97.6	-13.3	0.706698	6.8
R3	哈拉哈河	120.4536	47.3002	1099.2	-101.5	-13.8	0.706982	6.9
R4	大峡谷	120.6340	47.4994	1186.0	-95.1	-13.0	0.706358	7.2

杜鹃湖是火山喷发时,熔岩流堵塞河谷形成的堰塞湖,海拔1244 m,面积1.28 km²。杜鹃湖接受松叶湖的补给,松叶湖面积3.14 km²,河水通过东南处缺口流入松叶湖,湖水通过西南的出口汇入杜鹃湖。杜鹃湖湖水的氢氧同位素关系点偏离GMWL程度较轻,表明湖水的更新速度较快。哈拉哈河的3个水样与大峡谷河水的氢氧同位素关系点都落在GMWL上,表明河水受到的蒸发作用较小。哈拉哈河河水的氢氧同位素值都比杜鹃湖贫化,表明哈拉哈河的主要水量并不是来自杜鹃湖。哈拉哈河从阿尔山源头地区沿程水量不断增加,玄武岩熔岩隧道形成的地下暗河以及河道下部的熔岩管道不断地向哈拉哈河补给地下水,石塘林、三潭峡的河水量已经显著增加了。浅层地下水的同位素值最为贫化,氢氧同位素关系点落在GMWL上,表明其接受大气降水的补给^[8]。

驼峰岭天池水的更新速度最小,湖泊中降水所占比例远大于其他湖泊。根据驼峰岭天池水的同位素关系点可知,湖水中降水的同位素值比地下水富集,降水同位素关系点应该落在GMWL上,位于齐齐哈尔降水与哈拉哈河河水之间(图4)。由于阿尔山降水同位素比泉水、河水与湖水都富集,阿尔山地下水不可能接受来自当地山区降水的补给。同位素分析结果进一步证实了水量平衡关系得出的阿尔山新生代玄武岩地下水来自外源水的结论。

2.3 河水与湖水锶同位素分析

笔者测量了阿尔山天池水、杜鹃湖湖水、哈拉哈河河水、大峡谷河水中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值,见表1。由于⁸⁷Sr

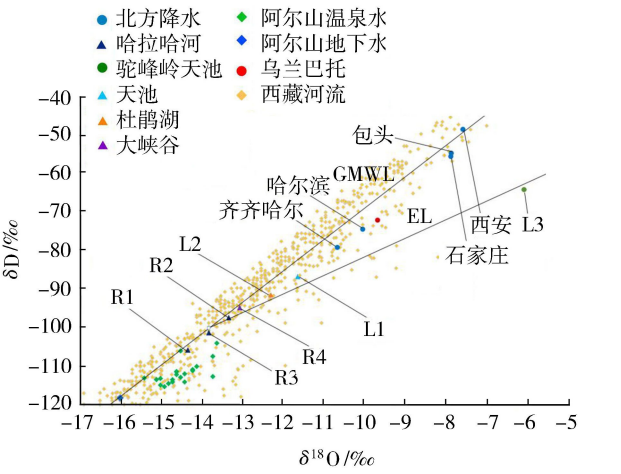


图4 阿尔山水体、北方降水与西藏河流的 $\delta D \sim \delta^{18}\text{O}$ 的关系

Fig.4 $\delta D \sim \delta^{18}\text{O}$ relationship between water body of Arshan, precipitation in northern China and rivers in Tibet

是由⁸⁷Rb 衰变得到的,⁸⁷Rb 属于原始核素,在地球形成初期就已存在,半衰期为 4.88×10^{10} a。一般来说,矿物的 Rb/Sr 比越低,由⁸⁷Rb 衰变得到的⁸⁷Sr 的含量越少,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值变化就越小。大气降水中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的值应接近现代海水均值,约为 $0.709\ 1^{[12]}$,阿尔山河水与湖水中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值在 $0.706\ 358\sim0.708\ 523$ 之间,小于大气降水的值,表明河水与湖水中混入了低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值的岩石中的锶,岩石中低比值的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 通过水岩反应溶解到了地下水中。本次采样的河水与湖水主要分布在新生代火山喷发形成的玄武岩台地上,阿尔山玄武岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 $0.703\ 5\sim0.703\ 9$,平均值为 $0.703\ 6^{[13]}$ 。虽然玄武岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值很低,但是通过水量平衡计算与氢氧同位素分析可知,当地降水不是阿尔山地下水的主要补给源,因此排除了降水与阿尔山玄武岩发生水岩反应生成低比值的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 混入地下水的可能性。

顾晓敏^[8]对阿尔山温泉群的氢氧同位素进行了分析,认为泉水的主要补给区为阿尔山国家森林公园。但水量平衡关系表明,发源于阿尔山的哈拉哈河主要补给源是外源水,这就否定了阿尔山温泉接受来自哈拉哈河源头降水补给的推断。阿尔山温泉水的氢氧同位素关系点部分落在 GMWL 上,大部分关系点偏离了 GMWL(图 4),可能是水岩反应造成¹⁸O 正漂移现象。阿尔山泉水的氢氧同位素比哈拉哈河更加贫化,表明补给温泉的地下水也来自外源水。

由图 4 可知,阿尔山玄武岩地下水的氢氧同位素比周边及北方地区的降水同位素贫化,但与西藏高原河水相同,这暗示着西藏高原可能是阿尔山外源水的补给源区。如果阿尔山外源水接受西藏高原的河流渗漏水补给,那么在西藏与阿尔山之间的岩石圈中应该存在连续的导水通道。研究发现,火成岩中玄武岩的 Rb/Sr 比最低为 0.06,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 $0.702\sim0.705$;沉积岩中除了碳酸盐岩外 Rb/Sr 比均较高,由⁸⁷Rb 衰变产生的⁸⁷Sr 不断增加,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值较高^[14]。由表 1 可知,阿尔山河水与湖水中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值较低,因此导水通道的岩性可能是碳酸盐岩或玄武岩。西藏高原与大兴安岭之间是由很多地块拼接而成,不存在连续的岩溶地层,因此,连接西藏与阿尔山等东部地区的地下水通道只可能是玄武岩熔岩管道。这就意味着阿尔山等东部地区的玄武质熔岩流来自西藏地幔岩浆,玄武质熔岩流冷却成岩过程中形成了连续的收缩缝,高原地区的地下水通过收缩缝向低海拔地区排泄,收缩缝演变成为管道型导水通道。

3 讨 论

3.1 外源水补给源区特征

补给阿尔山河流与湖泊的外源水必须同时满足 4 个条件:(a) 补给源区的高程远高于摩天岭;(b) 补给源区的河水与湖泊存在明显渗漏;(c) 外源水的氢氧同位素关系点与阿尔山河水、泉水落在相同的区域;(d) 在补给源区与阿尔山火山区之间存在导水通道。大兴安岭中部最高峰在阿尔山,南部与北部的海拔偏低,所以外源地下水应来自大兴安岭以外的高原。地表高程高于大兴安岭的高原包括太行山、六盘山、阴山、秦岭以及蒙古国的肯特山等地区。由图 4 可以看出,大兴安岭周边的齐齐哈尔、哈尔滨、乌兰巴托、包头、石家庄、西安等地区的降水同位素远比阿尔山河水与泉水富集,不满足补给源区的降水同位素特征。而且,这些地区属于干旱区或半干旱区,降水量远小于潜在蒸发量,基本上没有稳定的河流与湖泊,也没有发现河水或湖水出现渗漏的情况。能够完全满足条件(a)(b)(c)的只有西藏高原。西藏高原平均海拔达到 5 000 m;河流与湖泊存在渗漏^[15];部分河流的氢氧同位素关系点与阿尔山河水、泉水落在相同的区域,见图 4。

阿尔山泉水来自大气降水,泉水中的氡值在 1.3~11.6 TU 之间,由于大气降水中的氡值一般小于 10 TU^[8],所以泉水中的氡应该来自大气核试验时期,阿尔山泉水属于现代水补给。哈拉哈河的主要流量来自阿尔山火山玄武岩地区,另一条支流来自地下河,地下河是由熔岩隧道构成的,见图 1。火山锥体中溢出的泉水是阿尔山河流与湖泊的稳定补给源,由此判断火山喷发后岩浆冷却形成的收缩缝可能是外源水的排泄通道。

3.2 玄武岩导水通道

研究发现,西藏高原的河流与湖泊存在渗漏。西藏内流区存在 13 个淡水湖泊,根据盐分平衡关系推断,这些淡水湖泊都存在渗漏;一些河流在经过裂谷与断层后水量大幅度减少,并最终消失,表明河流存在渗漏^[15]。Zhou 等^[16]对纳木错湖进行了为期 5 a 的水量平衡关系研究,确定纳木错湖存在渗漏,渗漏量为 $120\sim190\ \text{m}^3/\text{s}$ 。李伶^[17]利用全球陆地资料同化和重力恢复与气候实验数据进行反演计算确定,西藏内流区每年有 (540 ± 4) 亿 m^3 的地下水渗漏到了周边地区。Xiang 等^[18]利用水文大地测量,结合卫星重力和卫星测

高资料、水文模型和冰川均衡调整模型,定量分析了 2003—2009 年青藏高原周边地区包括长江源区、柴达木盆地、阿克苏盆地等的地下水存储量逐年增加的原因,发现柴达木盆地与塔里木盆地的降水稀少,几乎不能入渗补给地下水,增加的地下水量来自西藏高原。鄂尔多斯、内蒙古高原、华北平原、长白山等地区的地下水接受西藏渗漏水补给,地下水的年龄自西向东逐渐增加,约在 20~40 a 之间^[19-20]。

西藏渗漏水经过的喷发岩种类有玄武岩、流纹岩、安山岩等,但只有玄武岩喷发地区存在丰富的地下水,流纹岩与安山岩地区却没有这种情况。这意味着,岩浆通道中连续的收缩缝仅存在于玄武岩中。玄武岩在冷却过程中能够形成连续的收缩缝可能与其黏性有关。玄武岩属于碱性, SiO_2 的含量较低,因此熔岩的黏性较低,低黏度的岩浆在冷却成岩过程中容易开裂。由于地幔岩浆通过地壳断裂带进入岩石圈后形成的岩浆流在截面上的速度存在差异,中心的流速最大而边缘的流速最小,流速的差异造成了流动截面上密度的差异,岩浆流截面中心的密度小于边缘区,收缩缝更容易出现在存在密度差异的流动面上,所以玄武岩岩浆在冷却过程中可在流动界面上形成贯通的收缩缝。例如,六边形或五边形的玄武岩石柱的收缩缝都是沿着流动方向排列的。而流纹岩与安山岩中 SiO_2 的含量较高,岩浆的黏性很大,冷却成岩过程中不易开裂,岩浆冷却成岩体积减小,收缩的体积空间被膨胀的挥发性气体所占据,形成一个个球状的气泡,而气泡之间一般是不贯通的。所以,黏性大的流纹岩、安山岩等的冷却收缩空腔不能形成导水通道。

3.3 印度板块俯冲造成东部地区地应力反转

如果西部的地下水通过玄武岩熔岩隧道传输到东部地区,那么东部的新生代火山岩浆应该来自西部。晚中生代以来,中国东部的地幔岩浆注入了新的软流圈物质^[21]。西太平洋沟弧盆体系是欧亚东缘深部熔融体上涌造成区域性隆起,进而发生大规模断裂所致,并非弧后扩张引起^[22]。关于东部新生代上涌岩浆的来源,学术界有 3 种观点:(a)来自西太平洋板块俯冲^[23];(b)来自上涌的地幔柱^[24];(c)印度板块俯冲造成西部岩浆向东流动并涌出^[25]。地应力研究发现,新生代以来中国西部与东部的地应力状态发生了反转,西部地区由拉张变为挤压,而东部则由挤压转变为伸展^[25]。这意味着新生代以来东部地区上涌的地幔岩浆可能与印度板块俯冲有关。

研究发现,阿尔山、大同与汉诺坝新生代玄武岩中的铈-钕-铅等同位素值相近,落在了印度洋(MORB)端元内,微量元素分析表明物质来自亏损地幔,与太平洋(MORB)存在明显差异,因此亏损地幔物质不是来自太平洋(MORB)^[6]。通过对中国东部中、新生代火成岩的岩石学、地球化学、时空分布特征及构造背景等方面的研究,认为东部新生代火成岩不具备地幔柱活动的典型特征,与地幔柱没有直接关系^[26]。对比研究发现,中生代与新生代玄武岩的微量元素与铈-钕-铅同位素值存在明显的差异,中生代玄武岩来自富集地幔,而新生代玄武岩来自亏损地幔,岩浆的来源发生了明显的变化^[27]。这意味着西部与东部地应力反转可能是印度板块俯冲造成的。

3.4 西部岩浆东流形成玄武岩导水通道

由上述讨论可知,晚中生代—新生代以来,印度板块引起的岩浆活动到达了东部地区,东部火山喷发可能主要是印度板块的俯冲引起的,而不是太平洋板块。印度-欧亚板块碰撞后地壳缩短,地壳岩石圈由伸展变为挤压^[25]。西部地幔软流圈受到印度板块俯冲插入挤压后向东部等地区流动,东部地幔岩浆压力升高通过裂谷上涌,岩石圈由原来的挤压变为伸展,岩浆类型与中生代以前发生了较大的变化。新生代以来,中国东部地区经历了火山喷发、拉伸裂谷、盆地沉降、热沉降阶段,油气藏形成,岩石圈减薄等地质过程^[28]。前人用岩石圈拆沉、折返、减薄、克拉通破坏等概念解释了东部岩石圈远比西部岩石圈薄的原因,认为东部克拉通发生了拆沉破坏^[29]。地下水深循环可能提供了一个新的研究思路,西部的渗漏水通过玄武岩冷却收缩缝向东部排泄的过程中,不断形成新的地幔岩石圈,西部岩石圈在地下水深循环作用下快速增厚。

地球物理探测证实,中国西部到东部地区存在连续的高导低速(地震波传输速度)结构。因为水具有高导电性和低密度性,所以探测到的高导低速层可能是导水构造^[15]。研究发现,黄土高原的形成可能也与深循环地下水存在密切关系,在鄂尔多斯盆地上涌的深循环地下水将风尘颗粒黏滞在一起最终形成了黄土高原^[30]。早期进入玄武岩质导水通道的深循环地下水则会发生 3 种物理化学作用:(a)深循环地下水被加热为超临界水,超临界水具有强烈的萃取性,可以将玄武岩质导水通道中大量的铁、镁、钙、锰等元素萃取带出;(b)上涌的地下水黏滞了风尘颗粒,形成了连续的堆积;(c)铁、锰等与氧气发生氧化反应,生成三氧化二铁(锰)胶膜吸附在风积颗粒表面,形成了红土或红色风化壳^[31]。西部大量的物质被深循环地下水带出并沉积

在东部地区,造成了青藏高原隆升及东部地区下沉,使中国大陆宏观构造演化过程类似于“跷跷板”模式^[32]。

4 结 论

- a. 水量平衡关系表明,阿尔山新生代玄武岩地区径流量与蒸散发量之和远大于降水量,补给河流的泉水来自外源水,哈拉哈河源头形成的不冻河表明地下水经历了深部循环加热过程。
- b. 研究发现满足外源水补给条件的地区只有青藏高原,西藏内流区平均海拔 5 000 m,水量呈现出高度不平衡,河流与湖泊通过裂谷或断裂带渗漏到低海拔地区;阿尔山泉水与湖水的氢氧同位素远比北方降水贫化,但与西藏河水相同。
- c. 通过对阿尔山河水与泉水的锶同位素分析,发现水中的锶主要来自玄武岩,青藏高原与欧亚板块东部地区存在导水通道。低黏性的碱性玄武质熔岩在冷却过程中形成了连续的收缩缝,最终演变成为管道型跨流域的导水通道。西部地幔岩石圈增厚可能与地下水的跨流域补给有关。

参考文献:

[1] 贾福海, 秦志学. 我国玄武岩地下水的基本特征[J]. 水文地质工程地质, 1993, 20(4): 30-32. (JIA Fuhai, QIN Zhixue. Basic characteristics of basalt groundwater in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1993, 20(4): 30-32. (in Chinese))

[2] 贾福海. 中国玄武岩地下水[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[3] 李振海. 气候变化对阿尔山市湿地的影响分析[J]. 现代农业, 2014(7): 77-80. (LI Zhenhai. Impact of climate change on Wetlands in Arxan[J]. Modern Agriculture, 2014(7): 77-80. (in Chinese))

[4] 马雨轩, 李江海, 陈耀华. 大兴安岭中段阿尔山地区第四纪火山地貌特征及其构造意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 96-105. (MA Yuxuan, LI Jianghai, CHEN Yaohua. Geomorphological characteristics of the quaternary volcanoes and their tectonic implications in Aershan Region, Central Greater Khingan Range[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 96-105. (in Chinese))

[5] 唐守贤. 内蒙兴安盟科右前旗阿尔山:五岔沟一带新生代火山岩[J]. 吉林地质, 1983(1): 35-47. (TANG Shouxian. The Aershan-Wuchagou cenozoic volcanic rocks in Keyouqianqi Xinganmeng of Inner Mongolia[J]. Jilin Geology, 1983(1): 35-47. (in Chinese))

[6] 赵勇伟. 大兴安岭第四纪火山地质与地球化学研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2010.

[7] 白志达, 田明中, 武法东, 等. 焰山, 高山: 内蒙古阿尔山火山群中的两座活火山[J]. 中国地震, 2005, 21(1): 113-117. (BAI Zhida, TIAN Mingzhong, WU Fadong, et al. Yanshan, Gaoshan: two active volcanos of the volcanic cluster in Arshan, Inner Mongolia[J]. Earthquake Research in China, 2005, 21(1): 113-117. (in Chinese))

[8] 顾晓敏. 阿尔山泉群地球化学特征及成因演化机制研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.

[9] 刘智明, 杜金方, 青德孟. 阿尔山近 40 年气候特征分析[J]. 北京农业, 2012(6): 207-208. (LIU Zhiming, DU Jinfang, QING Demeng. Nearly 40 years Arxan climate characteristics analysis[J]. Beijing Agriculture, 2012(6): 207-208. (in Chinese))

[10] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.

[11] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988. (HE Tian, SHAO Quanqin. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products[J]. Journal of Geo-Information Science, 2014, 16(6): 979-988. (in Chinese))

[12] SPOONER E T C. The strontium isotopic composition of seawater, and seawater-oceanic crust interaction[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1976, 31(1): 167-174.

[13] 薛笑秋, 陈立辉, 刘建强, 等. 中国东北软流圈地幔中的原始橄榄岩质地幔: 来自大兴安岭地区新生代玄武岩的地球化学证据[J]. 地球科学, 2019, 44(4): 1143-1158. (XUE Xiaqiu, CHEN Lihui, LIU Jianqiang, et al. Primordial peridotitic mantle component in Asthenosphere beneath Northeast China: geochemical evidence from Cenozoic Basalts of Greater Khingan Range[J]. Earth Science, 2019, 44(4): 1143-1158. (in Chinese))

[14] 马英军, 刘丛强. 地壳风化系统中的 Sr 同位素地球化学[J]. 矿物学报, 1998, 18(3): 350-358. (MA Yingjun, LIU Congqiang. Geochemistry of strontium isotopes in the crust weathering system[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1998, 18(3): 350-358. (in Chinese))

- [15] 陈建生,王庆庆. 北方干旱区地下水补给源问题讨论[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 1-8. (CHEN Jiansheng, WANG Qingqing. A discussion of groundwater recharge sources in arid areas of North China[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 1-8. (in Chinese))
- [16] ZHOU S, KANG S, CHEN F, et al. Water balance observations reveal significant subsurface water seepage from Lake Nam Co, south-central Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2013, 491(11): 89-99.
- [17] 李伶. 西藏之水救中国:地下水篇[M]. 北京: 华文出版社, 2020.
- [18] XIANG Longwei, WANG Hansheng, HOLGER S, et al. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 49: 228-239.
- [19] 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))
- [20] 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))
- [21] 路凤香,李方林,韩吟文,等. 中国大陆新生代上地幔铅同位素特征[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2009, 34(1): 11-16. (LU Fengxiang, LI Fanglin, HAN Yinwen, et al. Characteristics of Pb isotopic composition in upper mantle cenozoic for China Continent[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(1): 11-16. (in Chinese))
- [22] 藤田至则. 日本列岛的地质构造及其演化[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(4): 305-318. (YUKINORI Fujita. Geological structure and evolution of Japanese Islands[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, 8(4): 305-318. (in Chinese))
- [23] ZOU H, ZINDLER A, XU X, et al. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance[J]. Chemical Geology, 2000, 171(1/2): 1-47.
- [24] 邓晋福,赵海玲,吴宗絮. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动[J]. 现代地质, 1992, 6(3): 267-274. (DENG Jinfu, ZHAO Hailing, WU Zongxu. A mantle plume and lithospheric movement under the North China continent[J]. Modern Geology, 1992, 6(3): 267-274. (in Chinese))
- [25] 邓晋福,肖庆辉,邱瑞照,等. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 751-761. (DENG Jinfu, XIAO Qinghui, QIU Ruizhao, et al. Cenozoic lithospheric extension and thinning of North China: mechanism and process[J]. Geology in China, 2006, 33(4): 751-761. (in Chinese))
- [26] 李凯明,汪洋,赵建华,等. 地幔柱、大火成岩省及大陆裂解:兼论中国东部中、新生代地幔柱问题[J]. 地震学报, 2003, 25(3): 314-323. (LI Kaiming, WANG Yang, ZHAO Jianhua, et al. Mantle plume, large igneous province and continental breakup-additionally discussing the cenozoic and mesozoic mantle plume problems in east China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 314-323. (in Chinese))
- [27] 谢昕,徐夕生,邹海波,等. 中国东南沿海中-新生代玄武岩微量元素和 Nd-Sr-Pb 同位素研究[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 617-628. (XIE Xin, XU Xisheng, ZOU Haibo, et al. Trace element and Nd-Sr-Pb isotope studies of Mesozoic and Cenozoic basalts in coastal area of SE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(4): 617-628. (in Chinese))
- [28] REN J, TAMAKI K, LI S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344(3/4): 175-205.
- [29] 周新华. 华北中-新生代大陆岩石圈转型的研究现状与方向:兼评“岩石圈减薄”和“克拉通破坏”[J]. 高校地质学报, 2009, 15(1): 1-18. (ZHOU Xinhua. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath North China in Cenozoic-Mesozoic: Revisited[J]. Geological Journal of China Universities 2009, 15(1): 1-18. (in Chinese))
- [30] 陈建生,刘震,刘晓艳,等. 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, et al. Deep-circulation groundwater maintains continuous deposition of dusty particles in Loess Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 278-287. (in Chinese))
- [31] 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, 37. (CHEN Jiansheng, WANG Wenfeng. Study on formation mechanism of laterite and loess soils under action of deep groundwater circulation[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 1-7, 37. (in Chinese))
- [32] 刘光鼎. 中国大陆构造格架的动力学演化[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 39-46. (LIU Guangding. Geodynamical evolution and tectonic framework of China[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 39-46. (in Chinese))