

doi: 10.12029/gc20220312

周长松, 邹胜章, 朱丹尼, 林永生, 王佳, 樊连杰, 李军, 蓝芙宁, 李衍青, 邓日欣, 缪雄谊. 2022. 四川昭觉地区优质偏硅酸地下水的特征、成因及其开发利用建议[J]. 中国地质, 49(3): 849–859.

Zhou Changsong, Zou Shengzhang, Zhu Danni, Lin Yongsheng, Wang Jia, Fan Lianjie, Li Jun, Lan Funing, Li Yanqing, Deng Rixin, Miao Xiongyi. 2022. Characteristics, causes and development suggestions of high quality groundwater containing metasilicate in Zhaojue area, Sichuan Province[J]. Geology in China, 49(3): 849–859(in Chinese with English abstract).

四川昭觉地区优质偏硅酸地下水的特征、成因及其开发利用建议

周长松^{1,2}, 邹胜章¹, 朱丹尼¹, 林永生¹, 王佳¹, 樊连杰¹,
李军³, 蓝芙宁¹, 李衍青¹, 邓日欣¹, 缪雄谊¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所 自然资源部/广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室 广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 3. 河北建筑工程学院 河北省水质工程与水资源综合利用重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要:【研究目的】近年来,随着生活水平的不断提高,人们对健康饮水的要求也在不断提高,寻找与开发富含 H_2SiO_3 等矿物质优质地下水已成为关键。【研究方法】本文以昭觉地区水文地质调查工程、地下水污染调查工程所获取的地下水化学数据为基础,探讨了昭觉地区富 H_2SiO_3 地下水的分布特点、元素水文地球化学特征、形成条件及成因。【研究结果】结果显示:(1)全县富 H_2SiO_3 (≥ 25 mg/L)地下水均属于低矿化度偏碱性水,分布在基底岩石为玄武岩的6个片区, H_2SiO_3 含量一般介于25.74~46.04 mg/L,pH含量一般介于7.4~8.58,TDS含量一般介于49.4~333 mg/L;(2)玄武岩地下水存在 HCO_3-Ca 、 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 、 $HCO_3-Ca \cdot Na$ 、 $HCO_3-Ca \cdot Mg \cdot Na$ 、 HCO_3-Na 等5种水化学类型,总体以 $HCO_3-Ca \cdot Mg$ 为主,其次为 HCO_3-Ca ,再次为 $HCO_3-Ca \cdot Na$,三者分别占总采样点数的50.00%、25.76%、12.12%;(3)全县富 H_2SiO_3 地下水的形成受水岩相互作用、硅酸盐矿物的分布范围及其可溶性、围岩裂隙发育程度、水源涵养及补给条件等四方面因素影响,其中水岩相互作用占据主导作用;(4)在后续开发利用过程中,需进一步揭示影响地下水中 H_2SiO_3 分布与迁移的因素。【结论】研究结果可以为昭觉地区矿泉水产业的发展及城乡优质水源地的建设提供依据。

关键词: 偏硅酸;地下水;玄武岩;生态环境;健康;开发利用;水文地质调查工程;四川省

创新点: 系统总结了昭觉县优质偏硅酸地下水空间分布特征和水化学特征;从形成条件与水岩作用的角度探讨了优质偏硅酸地下水的形成机制。

中图分类号:P632;P596 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)03-0849-11

Characteristics, causes and development suggestions of high quality groundwater containing metasilicate in Zhaojue area, Sichuan Province

收稿日期:2020-04-01;改回日期:2022-05-10

基金项目:广西重点研发计划(桂科 AB21220044、桂科 AB21075002、桂科 AB18050026)、国家研发计划课题(2017YFC0406104)、国家自然科学基金(41902261)、中国地质调查局地质调查项目(DD20190825、DD20160302、DD20221758)、中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2021013)共同资助。

作者简介:周长松,男,1987年生,硕士,助理研究员,主要从事岩溶区水文地质环境地质;E-mail:changsongzhou@karst.ac.cn。

通讯作者:邹胜章,男,1969年生,博士,研究员,主要从事岩溶区水文地质环境地质;E-mail:zshzh@karst.ac.cn。

ZHOU Changsong^{1,2}, ZOU Shengzhang¹, ZHU Danni¹, LIN Yongsheng¹, WANG Jia¹, FAN Lianjie¹,
LI Jun³, LAN Funing¹, LI Yanqing¹, DENG Rixin¹, MIAO Xiongyi¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics of Ministry of Land and Resources, Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China ;2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;3. Hebei Key Laboratory of Water Quality Engineering and Comprehensive Utilization of Water Resources, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective]In recent years, the drinking water health issues has been taken due to the improvement of living standards. Finding and developing high-quality groundwater with high-level minerals (e.g. H_2SiO_3) has become the key step in improving human health.**[Methods]**The hydrogeological survey and groundwater pollution survey were carried out in the Zhaojue County, and the spatial distributions of H_2SiO_3 -rich groundwater, hydrogeochemical components characteristics and factors were revealed.**[Results]**The main results including: (1) The groundwater with H_2SiO_3 (≥ 25 mg/L) was identified as the low salinity and alkaline water, which distributed in the six areas with the basement rocks of basalt. The H_2SiO_3 concentration was generally 25.74–46.04 mg/L, pH level was generally 7.4–8.58, and TDS level is generally 49.4–333 mg/L; (2) The H_2SiO_3 -rich groundwater of study area was characterized by the low mineralization while the main hydrochemical types of groundwater are $HCO_3^- Ca \cdot Mg$ and $HCO_3^- Ca$; (3) The H_2SiO_3 -rich groundwater was influenced by the water-rock interactions, the distribution range and solubility of silicate minerals, the development of surrounding rock fissures, and water conservation and recharge conditions in the county, among which the water-rock interactions play a critical role; (4) It is necessary to further reveal the main factors affecting the distribution and migration of H_2SiO_3 in groundwater in the subsequent development and utilization process.**[Conclusions]**The results can provide a basis for the development of mineral water industry and the construction of urban and rural high-quality water sources in Zhaojue area.

Key words: H_2SiO_3 ; groundwater; basalt; ecosystem; health; development and utilization; hydrogeological survey engineering; Sichuan Province

Highlights: The spatial distribution characteristics and hydrochemical characteristics of high-quality metasilicate groundwater were systematically summarized in Zhaojue County; The formation mechanism of high-quality metasilicate groundwater was discussed from the perspective of formation conditions and water-rock interaction.

About the first author: ZHOU Changsong, male, born in 1987, assistant researcher, mainly engaged in the study of hydrogeological environment geology in karst rrea; E-mail: changsongzhou@karst.ac.cn.

About the corresponding author: ZOU Shengzhang, male, born in 1969, researcher, mainly engaged in the study of hydrogeological environment geology in karst rrea; E-mail: zshzh@karst.ac.cn.

Fund support: Supported by the Key Research and Development Program of Guangxi (No. GuikeAB21220044, No. GuikeAB21075002, No. GuikeAB18050026), the National Key Research and Development Program of China(No. 2017YFC0406104), the National Natural Science Foundation for Young Scholars of China(No. 41902261), the project of China Geological Survey(No. DD20190825, No. DD20160302, No. DD20221758), and the Basic Research Projects of the Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (No.2021013).

1 引 言

偏硅酸(H_2SiO_3)矿泉水因含有活性硅,在医学上对软化人体血管、缓解动脉硬化、心血管和心脏疾病具有显著的作用(王娟等,2000;阮巍,2018;孙厚云等,2020)。中国 H_2SiO_3 矿泉水主要分布在火

山岩、岩浆岩地区,其中玄武岩、花岗岩分布区尤为丰富,如广泛分布玄武岩的雷琼地区、长白山地区、昆明西山(陈昌亮,2015;Yan et al.,2016;尚子琦,2019;单婷婷等,2019)以及分布花岗岩的浙北地区、长春地区(严金叙,1993;孙岐发等,2017;孙岐发等,2019)。查清地下水 H_2SiO_3 的分布特点、水文

地球化学特征及其控制因素等,既是有效开发利用富 H_2SiO_3 地下水资源的先决条件,也是水文地质调查、地下水环境基础状况调查服务社会的重要方向,一直是水文地质学、环境地球化学等持续探讨的热点(Dafny et al., 2006; 姚锦梅等, 2007; Koh et al., 2017; 胡勇德等, 2017; 唐杰等, 2019; 周长松等, 2021)。进入21世纪以来,中国的水文地质调查经历了由偏重水文地质条件、到兼顾环境地质状况、再到水文地质-环境地质-生态地质并举的多次转型或跨越,但水文地球化学循环的理念一直未变,保障居民安全饮水、支撑经济社会持续发展的水文地球化学研究一直在不断深入与扩展(李小牛等, 2014; Xia et al., 2016; 王珺瑜等, 2017; Zhou et al., 2018; 苏春利等, 2019),为系统总结地下水中包含 H_2SiO_3 等矿物或元素在内的分布规律、认识地下水中 H_2SiO_3 迁移循环等提供了重要线索。

自21世纪以来,中国实施了多项地质调查工程,“水文地质调查”、“地下水污染调查”就是其中的两项。昭觉地区是近几年持续开展水文地质调查、地下水污染调查的重点区域,积累了较为丰富的水化学数据。对于经济发展相对落后、资源相对匮乏的昭觉县而言,总结其富 H_2SiO_3 地下水分布特征、成因机制等具有现实意义。本文拟以所积累的相关水化学数据为基础,专门对昭觉县境内有关富 H_2SiO_3 地下水、 H_2SiO_3 的水文地球化学分布、元素组合及其成因来源等做一归纳分析,期望能为相关地区开发利用珍贵富 H_2SiO_3 地下水资源、促进 H_2SiO_3 等微量元素的水文地球化学深入研究等提供部分借鉴或参考。

2 研究区概况及研究资料来源

昭觉县位于四川省凉山彝族自治州中部偏东,处于金沙江流域上游西溪河流域,是中国典型的“彝族之县”, $102^{\circ}22' \sim 103^{\circ}19'E$, $27^{\circ}45' \sim 28^{\circ}21'N$,国土面积 $2699 km^2$,辖1个镇,46个乡(图1)。受金沙江水系强烈切割剥蚀,总体地势西高东低,发育低山、低中山、中山、山间盆地、阶地、河漫滩地、洪积扇等地貌,其中山原类地貌约占全县面积的89%,平均海拔 $2170 m$ 。气候属于川西高原雅砻江温带气候,年平均气温 $10.9^{\circ}C$,年平均降雨量 $846.1 mm$ 。区内地层从东到西依次发育有寒武系、奥陶

系、志留系、泥盆系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系和第四系,其中二叠系中统阳新组(P_2y)、三叠系下统嘉陵江组(T_1j)、三叠系中统雷口坡组(T_2l)、侏罗系上统牛滚组(J_3n)为主要的碳酸盐岩地层,二叠系上统峨眉山玄武岩(P_2em)为主要的岩浆岩地层,三叠系上统白果湾组(T_3bg)、三叠系上统须家河组(T_3xj)、侏罗系中统沙溪庙组(J_3s)、白垩系下统飞天山组(K_1f)、白垩系下统小巴组(K_1-x)为主要碎屑岩地层。区内断裂发育,且以南北向断裂为主,代表性的有四开伊林断裂、木佛山断裂、热克断裂等,近北西-南东向展布的竹核断裂切割了木佛山、热克等南北向断裂,且具有明显的平错性质,断距 $0.5 \sim 1.5 km$,断裂两侧岩石破碎,可见断层泥、断层角砾、断层崖,沿断裂带有串珠状泉水出露(图1)。

全县区域水文地质调查背景资料显示(图1),富 H_2SiO_3 地下水多分布在连片玄武岩区,其中下游区域尤为典型,如昭觉县中南部的久特洛古乡、塘且乡、美甘乡等,因为广泛出露玄武岩地层,发育了含量较高的 H_2SiO_3 地下水。除玄武岩下游区之外,在玄武岩有区域性断裂通过的地块,也是地下水 H_2SiO_3 高背景主要分布区。总体看来,大面积的富 H_2SiO_3 地下水分布与地质背景密切相关。 H_2SiO_3 多与硅酸盐矿物有内在联系,而玄武岩富含长石、辉石等硅酸盐矿物,所以玄武岩地区是富含 H_2SiO_3 地下水的主要区域。同样,因为昭觉地区玄武岩分布范围较大(约 $740 km^2$),因此全县富 H_2SiO_3 地下水较为丰富。

21世纪以来,在中国地质调查局组织实施的多项地质调查工程的推动下,昭觉县于2015年率先结束全县的1:250000地下水污染调查,收集到27组县域地下化学测试数据。2019年,又通过开展县域地下水环境质量评价和重点区域水文地质调查等,收集到昭觉县地下水、地表水 H_2SiO_3 及相关微量元素的测试数据近300组。本次对上述数据进行了整理分析,采取同一地下水系统范围内上下游控制布点、各种补给类型水点兼顾、水样采集时间较为一致的原则,最终确定2019年平水期66组数据为有效数据。上述66组数据分别对应66个不同采样点,其中包含纯玄武岩补给泉30组(编号QS01~QS30)、玄武岩-碳酸盐岩混合补给泉9组(编号TS01~TS09)、玄武岩-碎屑岩混合补给泉8组

(编号SX01~SX08)、玄武岩温泉4组(编号WQ01~WQ04)、碳酸盐岩补给泉5组(编号YR01~YR05)、碎屑岩补给泉10组(编号YC01~YC10)。每个采样点均有现场GPS定位、现场测试(测试指标包括pH、EC、Ca²⁺、HCO₃⁻等)记录。样品测试工作由自然资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成,采取的测试标准为GB/T8538-2008和DZ/T0064-1993。测试指标包括一般化学指标、毒理学指标等27项无机指标。测试过程中采用了平行双样法进行质量控制,分析误差(相对偏差)符合GB/T5750.3-2006《生活饮用水标准检验方法—水质分析质量控制》技术要求。

3 地下水H₂SiO₃分布及其主要富H₂SiO₃区

3.1 昭觉地下水H₂SiO₃分布特征

昭觉境内的地下水H₂SiO₃分布极不均匀,H₂SiO₃含量最高的地下水与H₂SiO₃含量最低的地下水之间、H₂SiO₃含量可以相差8.85倍。按照

GB8537-2018食品安全国家标准 饮用天然矿泉水H₂SiO₃含量≥25 mg/L就属于富H₂SiO₃地下水,适合开发成矿泉水,在平均1个样/40 km²的面上地下水样品采集数据中,全县富H₂SiO₃地下水比例不足20%。全县地下水H₂SiO₃含量分布范围通常为5.20~46.04 mg/L。对昭觉地下水H₂SiO₃分布做一宏观分析后发现:

(1)玄武岩区地下水H₂SiO₃总体要比非玄武岩区高。全县玄武岩区地下水的H₂SiO₃均值是21.16 mg/L,比昭觉碎屑岩区地下水的H₂SiO₃均值11.22 mg/L高出0.89倍,比昭觉碳酸盐岩区地下水的H₂SiO₃均值6.25 mg/L高出2.38倍。

(2)玄武岩区温泉H₂SiO₃含量总体要比冷泉水的高。全县玄武岩区温泉(水温25.6~41.6℃)的H₂SiO₃均值是43.23 mg/L,比昭觉纯玄武岩补给区地下水的H₂SiO₃均值21.39 mg/L高出1.02倍,比昭觉玄武岩与碎屑岩混合补给区地下水的H₂SiO₃均值12.48 mg/L高出2.46倍,比昭觉玄武岩与碳酸盐岩混合补给区地下水的H₂SiO₃均值18.29 mg/L高出1.36倍。

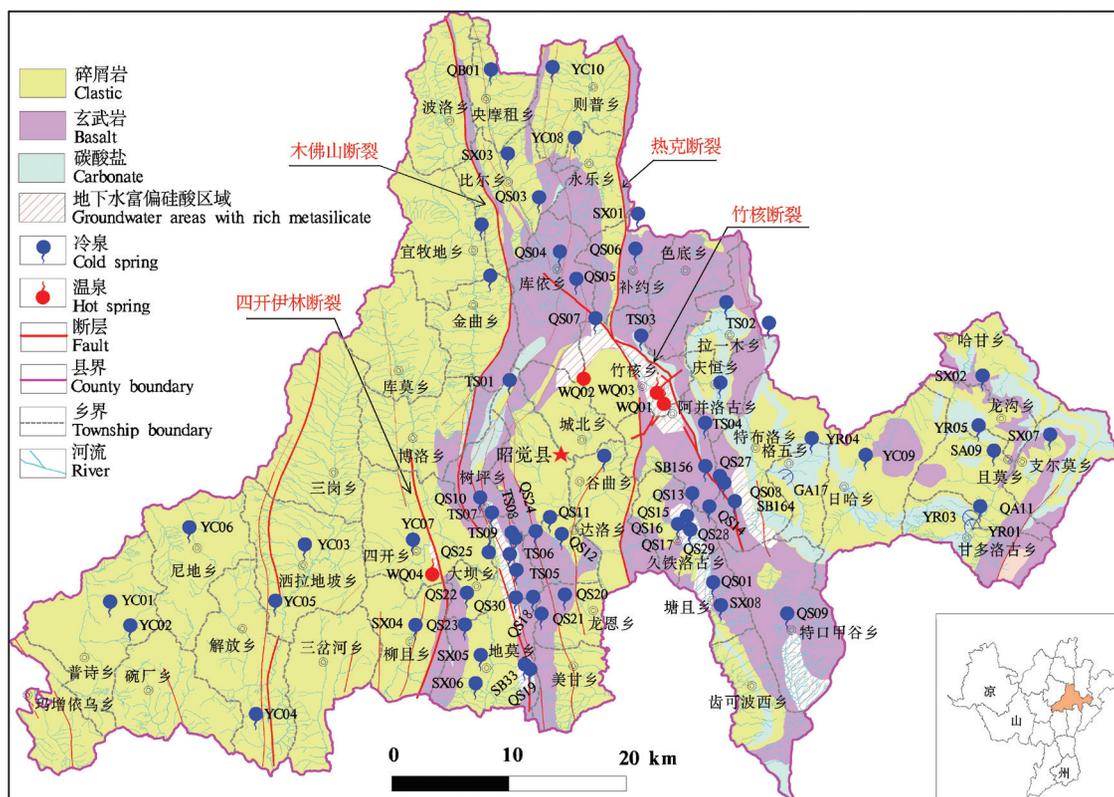


图1 昭觉县区域地质背景简图

Fig.1 Sketch map of geological background in Zhaojue County

(3)纯玄武岩下游地下水 H_2SiO_3 总体要比上游高。纯玄武岩下游地下水中 H_2SiO_3 出现多个超过25 mg/L,而上游地下水中 H_2SiO_3 含量均在25 mg/L以下,说明地表水沿途径流、入渗或地下水出流后再次入渗过程中存在硅酸盐矿物的不断溶滤,水-岩相互作用是本区泉水 H_2SiO_3 的主要来源途径。有关不同类型含水岩组 H_2SiO_3 含量分布的水文地球化学参数统计结果见表1,从中可看出,玄武岩含水岩组是昭觉相对最富 H_2SiO_3 的含水岩组,昭觉相对最富 H_2SiO_3 的玄武岩含水岩组 H_2SiO_3 均值低于昆明西山、雷琼地区、长白山等地玄武岩泉水 H_2SiO_3 均值。进一步按照不同含水岩组中 H_2SiO_3 均值大小,将昭觉地区 H_2SiO_3 地下水划分成:缺乏区(< 10 mg/L)、较缺乏区(10~15 mg/L)、较丰富区(15~25 mg/L)、丰富区(> 25 mg/L)四个等级,其中碳酸盐区地下水归为 H_2SiO_3 缺乏区,碎屑岩区地下水归为 H_2SiO_3 较缺乏区,玄武岩区地下水归为 H_2SiO_3 较丰富区、丰富区,具体见图2。

3.2 主要富 H_2SiO_3 地下水区

目前昭觉境内已经确定的富 H_2SiO_3 地下水区主要有4片,推测的富 H_2SiO_3 地下水区主要有2片,均分布在玄武岩区,偏硅酸含量介于25.74~46.04 mg/L,分布情况如图2所示。各片区地下水 H_2SiO_3 情况不尽相同,但均属于偏碱性低矿化度优质地下水,基本情况如下:

(1)竹核断裂带富 H_2SiO_3 区:该区位于昭觉县中部竹核乡,是昭觉县境内地下水 H_2SiO_3 含量最高分布区,主要由近北西走向竹核断裂控制,面积约29 km²,代表性的水点有WQ01、WQ02、WQ03这3个温泉, H_2SiO_3 含量39.92~46.04 mg/L,水温25.6~41.6℃,pH值7.83~8.58,锶(Sr)含量33.3~230.3 μg/L,TDS含量209~333 mg/L。本次调查发现,WQ01、WQ03两个温泉水流量较大(分别为25L/s、7.5L/s),且动态稳定, H_2SiO_3 和Sr含量均达到矿泉水水质标准(GB8537-2008),适当处理水中氟离子(F⁻)之后,可开发成大型矿泉水水源地。

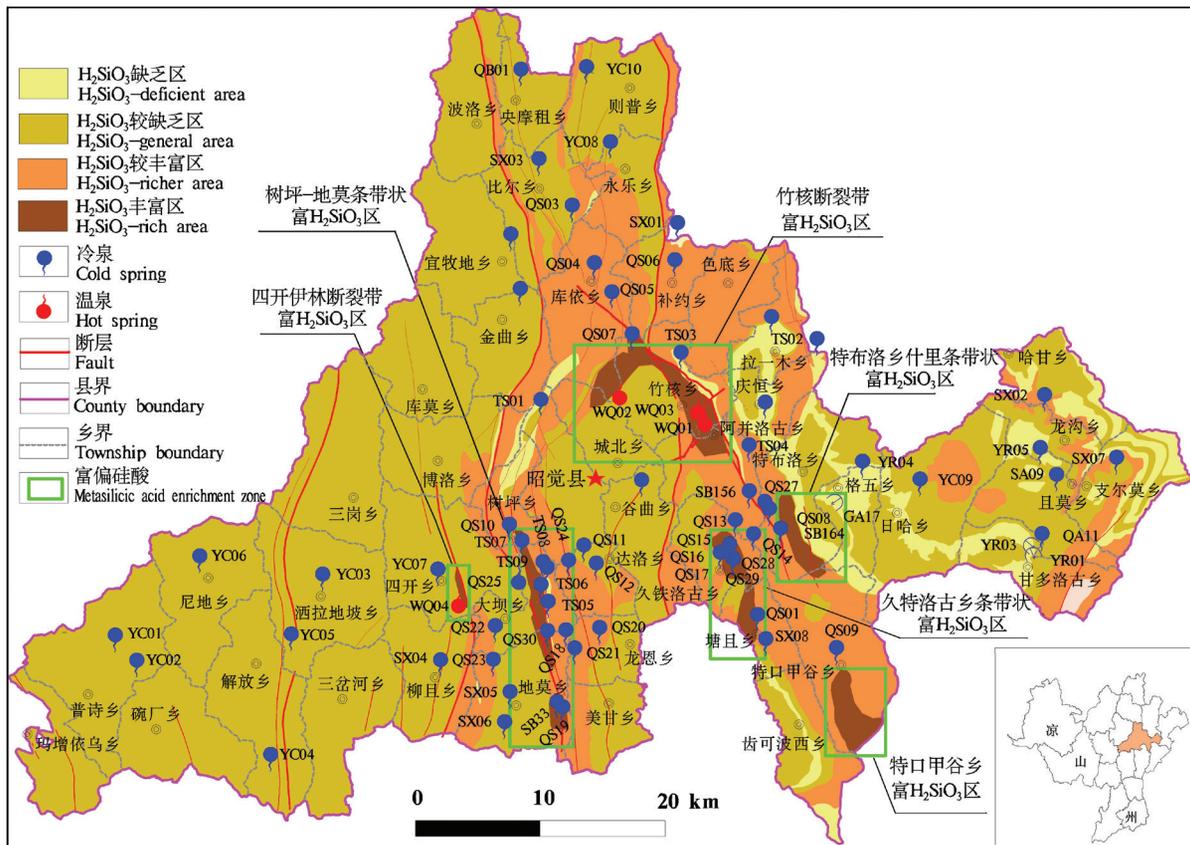
(2)四开伊林断裂带富 H_2SiO_3 区:该区位于昭觉县四开乡,呈北北西向条带状展布,由近北北西走向博洛至四开的伊林断裂带控制,面积约1.4 km²,代表性的水点有WQ04温泉,水温在28.6℃附近, H_2SiO_3 含量43.76 mg/L,pH值为8.45,Sr含量39 μg/L,TDS含量129 mg/L,满足偏硅酸矿泉水水质标准(GB8537-2008)。

(3)树坪一地莫条带状富 H_2SiO_3 区:该区位于昭觉县南部树坪乡与地莫乡之间,处于呈南北向展布的好谷拉达河东岸,面积约13.5 km²,补给区由连片玄武岩构成,地下水总体由东向西径流,好谷拉达河为排泄基准面。代表性的水点有TS07、QS25、QS30等泉点, H_2SiO_3 含量26.65~28.05 mg/L,水温19.6~28℃,pH值7.4~7.69,Sr含量27.2~750 μg/L,

表1 昭觉主要含水岩组地下水 H_2SiO_3 含量(mg/L)分布特征参数统计结果

| Table 1 Eigenvalue statistics of H_2SiO_3 concentration (mg/L) in the main water-bearing rock formations in Zhaojue County | | | | | | | |
|--|-----------------|-------------|----|--------------|-------------|-------|------|
| 地理位置 | 含水岩组类型 | 地下水类型 | N | 含量范围 | 平均值 | Cv | |
| 昭觉县 | 三叠系碳酸盐岩 | 冷泉 | 5 | 5.16~8.05 | 6.25 | 0.18 | |
| | 三叠系碎屑岩 | 冷泉 | 10 | 6.6~15.33 | 11.22 | 0.21 | |
| | 二叠系玄武岩 | 玄武岩-碳酸盐岩冷泉 | 温泉 | 4 | 39.92~46.04 | 43.23 | 0.05 |
| | | | 冷泉 | 30 | 15.35~30.88 | 21.39 | 0.18 |
| | | 玄武岩-碎屑岩冷泉 | 冷泉 | 9 | 9.19~28.05 | 18.29 | 0.35 |
| | | | 冷泉 | 8 | 6.6~18.41 | 12.48 | 0.30 |
| | 全县玄武岩泉水 | | 51 | 6.6~46.04 | 21.16 | 0.40 | |
| | 二叠系+三叠系 | 全县 | 66 | 5.16~46.04 | 18.52 | 0.48 | |
| | 昆明西山(单婷婷等,2019) | 二叠系玄武岩 | 冷泉 | 14 | 32.70~62.45 | 35.44 | 0.31 |
| | 雷琼地区(尚子琦,2019) | 新生代(第四系)玄武岩 | 温泉 | 13 | 5.86~81.8 | 44.04 | 0.50 |
| 长白山(陈昌亮,2015) | 新生代(第三系、第四系) | 玄武岩冷泉 | 26 | 27.81~75.06 | 55.12 | / | |
| | 玄武岩 | 玄武岩温泉 | 15 | 65.51~232.28 | 150.24 | / | |

注:表中N为参与统计的样品数,Cv为元素含量变异系数。

图2 昭觉县地下水 H_2SiO_3 分布图Fig.2 Spatial distribution of H_2SiO_3 groundwater areas in Zhaojue County

TDS 含量 68.6~230 mg/L。

(4)久特洛古乡条带状富 H_2SiO_3 区:该区位于昭觉县中部偏东久特洛古乡,呈北北西向条带状展布,处于展布方向呈北西向西溪河东岸,距离西溪河 0.2~2 km,面积约 12.2 km²。该区位于连片玄武岩下游,地下水总体由东向西径流。代表性的水点有 QS15、QS17、QS28、QS29 等泉点, H_2SiO_3 含量 25.74~30.87 mg/L,水温 13~22.5℃,pH 值 7.42~8.59, Sr 含量 33~64 μg/L, TDS 含量 49.4~113.3 mg/L。

(5)特布洛乡什里条带状富 H_2SiO_3 区:该区位于昭觉县中部偏东特布洛乡西南部什里一带,为推测富 H_2SiO_3 区,面积约 9.4 km²。推测依据为,该区及其上游连片分布玄武岩,且上游地下水 H_2SiO_3 含量较高(15.07~18.89 mg/L),水温 16.7~18.82℃,pH 值 7.10~7.83, Sr 含量 24.5~72.9 μg/L;由于昭觉地区存在“纯玄武岩区上游至下游 H_2SiO_3 含量有增加趋势”这一规律,结合地层岩性、地形坡度、调查水点分布特征,推测本区地下水富 H_2SiO_3 。

(6)特口甲谷乡富 H_2SiO_3 区:该区位于昭觉县东南部特口甲谷乡中部偏南特口洼洛村一带,为推测富 H_2SiO_3 区,面积约 13 km²。推测依据为,该区及其上游连片分布玄武岩,连片分布面积较大,而昭觉地区存在“纯玄武岩区上游至下游 H_2SiO_3 含量有增加趋势”这一规律,结合地层岩性、地形坡度及其他富 H_2SiO_3 区特征,推测本区地下水富 H_2SiO_3 。

除上述 6 片富 H_2SiO_3 地下水区外,还有一些区域也存在小范围的富 H_2SiO_3 地下水,但这些富 H_2SiO_3 地下水开发利用前景有限,非本文讨论的重点。

4 富 H_2SiO_3 地下水水化学特征

4.1 富 H_2SiO_3 地下水水化学类型特征

由前文分析可知,昭觉县富 H_2SiO_3 地下水均分布在峨眉山玄武岩区。本次按照舒卡列夫分类法,对昭觉峨眉山玄武岩区断裂带温泉(A型)、纯玄武岩冷泉(B型)、玄武岩-碳酸盐岩冷泉(C型)、玄武岩-碎屑岩冷泉(D型)等四种类型地下水水化学类

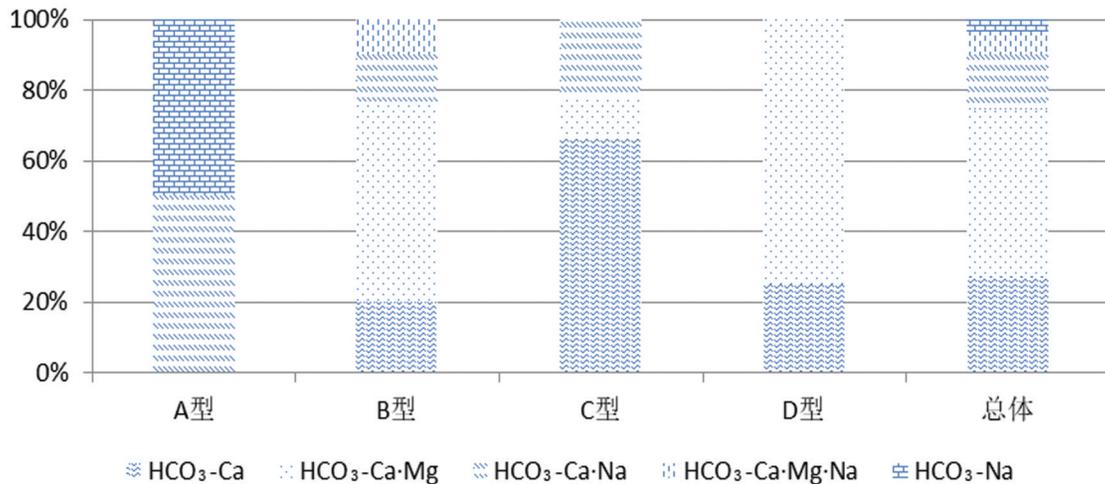


图3 研究区玄武岩区水化学类型状况图

(A型、B型、C型、D型样品数分别为4组、30组、9组、8组)

Fig. 3 Hydrochemical types in the basalt area of the study area

(The number of A, B, C, and D samples are 4 groups, 30 groups, 9 groups and 8 groups, respectively)

型进行分类(图3)。由图3可知,研究区玄武岩地下水存在 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 等5种水化学类型,总体以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 为主,其次为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$,再次为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$,三者分别占总采样点数的50.00%、25.76%、12.12%。具体到单一类型,A型玄武岩水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 为主,分别占该类型的50%、50%;B型玄武岩水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 为主,占该类型的56.67%;C型玄武岩水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 为主,占该类型的66.67%;D型玄武岩水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 为主,占该类型的75%。上述水化学类型特征揭示 HCO_3^- 为昭觉玄武岩区主要阴离子, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为昭觉玄武岩区主要阳离子。

与全国其他地区相比,研究区玄武岩地下水水化学类型与雷琼地区温泉(尚子琦,2019)、长白山地区冷泉(陈昌亮,2015)较为一致,均以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 为主,但与长白山地区温泉(以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 为主)(陈昌亮,2015)、昆明西山冷泉(以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 为主)(单婷婷等,2019)存在较大差异,揭示不同地区玄武岩地下水水化学类型可比性较差,这可能与不同地区气候、地质、人类活动等因素存在差异有关。

4.2 富 H_2SiO_3 地下水水化学相关性分析

通过对相关水化学组分的描述性统计与相关

分析,可以更好的揭示水化学特征,判断水样 H_2SiO_3 含量与水化学主要组分的相关程度,识别水化学组分的可能来源(孙厚云等,2018,2020)。对研究区 H_2SiO_3 含量 $> 25 \text{ mg/L}$ 的12组玄武岩地下水(泉)样品进行 Pearson 相关分析,得到水化学14项指标相关系数矩阵(表2),其中TDS与 Na^+ 、 F^- 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 含量显著相关,与 Cl^- 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 明显相关,相关系数分别为0.93、0.84、0.73、0.73、0.70、0.61、0.59;表明上述离子可能具有相同来源,对TDS的贡献具有重要影响,地下水主要组分来源于大气降水补给与岩石矿物风化溶解;TDS与TFe、Mn、Al相关系数均低于0.1,而TFe、Mn、Al是指示水土流失的重要指标,揭示本区地下水补给方式主要为缓慢入渗式补给,与南方地下河区灌入式补给有很大差异。地下水 H_2SiO_3 含量与 Na^+ 、 F^- 、TDS、pH 含量相关系数相对较高,表明研究区地下水中 H_2SiO_3 含量高低受到溶液pH值的重要影响,且在 H_2SiO_3 形成过程中,往往伴有 Na^+ 、 F^- 等元素的溶解;而与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等常规阴阳离子含量相关系数低,这可能与昭觉地区富 H_2SiO_3 地下水主要分布在基底岩石以玄武岩为主的区域有关。

5 富 H_2SiO_3 地下水形成条件与成因

5.1 富 H_2SiO_3 地下水形成条件

已有研究表明,地下水中 H_2SiO_3 的富集离不开

表 2 研究区水化学组分相关系数矩阵(N=12)

Table 2 Correlation coefficient of hydrochemical parameters of study area

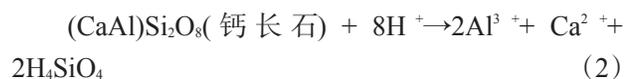
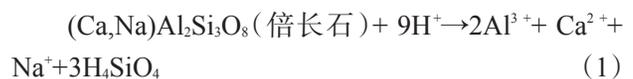
| | H ₂ SiO ₃ | TDS | pH | TFe | Sr | Mn | Al | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | F ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | 游离 CO ₂ |
|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| H ₂ SiO ₃ | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| TDS | 0.63* | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | |
| pH | 0.62* | 0.30 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | |
| TFe | -0.26 | 0.01 | -0.36 | 1.00 | | | | | | | | | | | | |
| Sr | -0.01 | 0.40 | -0.20 | 0.86** | 1.00 | | | | | | | | | | | |
| Mn | -0.29 | -0.02 | -0.40 | 0.99** | 0.80** | 1.00 | | | | | | | | | | |
| Al | -0.21 | 0.07 | -0.26 | 0.96** | 0.92** | 0.92** | 1.00 | | | | | | | | | |
| K ⁺ | 0.25 | 0.73** | -0.19 | 0.53 | 0.85** | 0.48 | 0.58* | 1.00 | | | | | | | | |
| Na ⁺ | 0.80** | 0.93** | 0.43 | 0.04 | 0.44 | 0.00 | 0.12 | 0.72** | 1.00 | | | | | | | |
| Ca ²⁺ | 0.02 | 0.59* | -0.23 | 0.70* | 0.92** | 0.66* | 0.73** | 0.91** | 0.54 | 1.00 | | | | | | |
| Mg ²⁺ | -0.58 | 0.07 | -0.63* | 0.77** | 0.75** | 0.75** | 0.77** | 0.57 | -0.09 | 0.74** | 1.00 | | | | | |
| F ⁻ | 0.69* | 0.84** | 0.31 | 0.35 | 0.67* | 0.29 | 0.44 | 0.80** | 0.91** | 0.66* | 0.15 | 1.00 | | | | |
| Cl ⁻ | 0.21 | 0.70* | -0.16 | 0.39 | 0.73** | 0.34 | 0.45 | 0.91** | 0.68* | 0.82** | 0.53 | 0.66* | 1.00 | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0.23 | 0.73** | 0.05 | 0.28 | 0.66* | 0.23 | 0.35 | 0.85** | 0.72** | 0.82** | 0.41 | 0.63* | 0.87** | 1.00 | | |
| HCO ₃ ⁻ | 0.07 | 0.61* | -0.17 | 0.62* | 0.84** | 0.57 | 0.65* | 0.83** | 0.52 | 0.95** | 0.67* | 0.65* | 0.69* | 0.74** | 1.00 | |
| 游离 CO ₂ | 0.00 | 0.39 | -0.55 | -0.1 | 0.11 | -0.07 | -0.13 | 0.44 | 0.22 | 0.40 | 0.30 | 0.10 | 0.47 | 0.41 | 0.46 | 1.00 |

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

四方面因素:(1)硅酸盐矿物的分布范围及其可溶性;(2)围岩裂隙发育程度;(3)水岩相互作用程度(沈照理等,2002);(4)水源涵养及补给条件(单婷婷等,2019)。只有当硅酸盐矿物分布范围广、溶解性强、围岩裂隙发育、水岩相互作用程度高、水源涵养及补给条件好,地下水中H₂SiO₃才能较易蓄积与发展。从昭觉地区富H₂SiO₃地下水分布情况来看,富H₂SiO₃地下水主要分布在玄武岩区,玄武岩矿物成分包含基性斜长石(以倍长石为主)、辉石、绿泥石、绿磷石、隐晶质、金属矿物、石英等(李昌年,1986;郑小敏等,2015),其中长石类矿物含量最为丰富。另外,玄武岩气孔中填充有绿泥石、石英等硅酸盐矿物(黎琪,2015)。上述硅酸盐矿物为地下水中H₂SiO₃富集提供了丰富的物源条件。研究区玄武岩较为发育的柱状节理裂隙、风化裂隙及构造裂隙,为地下水中H₂SiO₃富集提供了良好的储水和导水系统。富H₂SiO₃地下水主要分布在断裂带沿线或纯玄武岩下游,大气降水入渗-径流过程中存在长时间的水岩作用,为地下水H₂SiO₃富集提供了水动力条件。研究区起伏的地形条件及较为茂盛的灌木植被为富H₂SiO₃地下水的形成提供了良好的水源涵养和补给条件。

5.2 富H₂SiO₃地下水成因

在上述富H₂SiO₃地下水形成的四项条件中,地下水与围岩的长期相互水岩作用(包括溶滤作用、混合作用、水解作用等)是制约H₂SiO₃含量高低的最主要影响因素(党志等,1995;Lassaad et al.,2011;王周锋等,2015)。昭觉地区不同玄武岩区地下水H₂SiO₃含量及其他化学组分存在较大差异,其主要受溶滤作用和水解作用影响,溶滤作用、水解作用愈强,地下水中H₂SiO₃含量愈高。具体过程如下:首先,大气降雨降落到CO₂含量较为丰富的土壤层,增加了水体中H⁺及CO₂含量(蒋忠诚,1998;蒋忠诚等,1999);其次,入渗水进一步下渗至玄武岩地层,通过岩层的柱状节理裂隙、风化裂隙、构造裂隙向下运移,与玄武岩中倍长石、钙长石等基性斜长石以及辉石等铝硅酸盐、硅酸盐矿物发生较为充分的水岩作用产生H₂SiO₃,其中倍长石、钙长石等与水中H⁺发生离子交换反应,辉石在CO₂参与下发生溶解反应。具体化学方程式如(1)~(3):



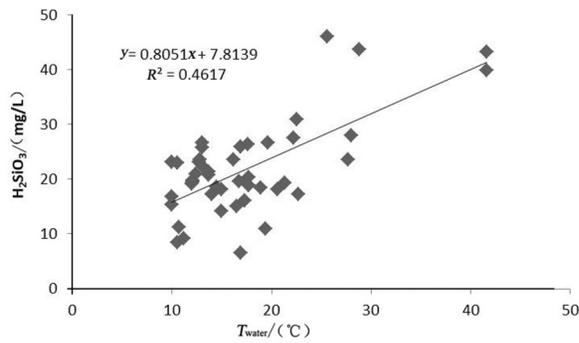
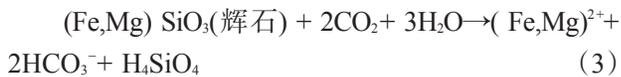


图4 昭觉县玄武岩区地下水 T_{water} 与 H_2SiO_3 关系曲线图
($N=45$)

Fig.4 Relationship between groundwater T_{water} and H_2SiO_3 in the basalt area of Zhaojue County



在上述水岩相互作用过程中,地下水温度(T_{water})高低也在一定程度上影响上述反应进程及地下水中 H_2SiO_3 含量,这是由于硅酸盐矿物溶解度往往有随温度增高而增大的趋势(断裂带温泉 WQ01、WQ03 等就属于较高水温导致较高溶解),并且在本区玄武岩地下水 H_2SiO_3 - T_{water} 关系曲线中得到了充分验证(图4)。

5.3 开发利用建议

昭觉富 H_2SiO_3 地下水与水岩作用程度、硅酸盐矿物分布范围及其可溶性、围岩裂隙发育程度、水源涵养及补给条件等因素紧密相关,不同水岩作用程度、硅酸盐矿物组成、围岩裂隙发育程度、水源涵养及补给条件,其元素水文地球化学特征存在较大差异,开发利用前景也不尽相同。寻求天然富 H_2SiO_3 地下水、且富 H_2SiO_3 地下水综合水质良好应是昭觉地区富 H_2SiO_3 地下水开发利用的主攻方向。另外,富 H_2SiO_3 地下水的水文地球化学特征及其成因物源研究是合理开发利用富 H_2SiO_3 地下水资源的基础,就表生水文地球化学元素迁移、转化而论,局部区域富 H_2SiO_3 地下水的形成极少是一个孤立的元素水文地球化学事件,地下水中 H_2SiO_3 及其相关元素分布不均匀应具有普遍性,昭觉地区的富 H_2SiO_3 地下水在这一点上也不例外,进一步查清控制昭觉玄武岩区地下水 H_2SiO_3 分布与迁移的主要水文地球化学因素是开发利用富 H_2SiO_3 地下水资源的重要环节。

除此之外,可以优先考虑“竹核断裂带富 H_2SiO_3 区”温泉开发,该区 WQ01、WQ03 两个温泉交通便利,泉流量较大,分别为 25 L/s、7.5 L/s,且动态稳定, H_2SiO_3 和 Sr 含量均达到矿泉水水质标准,适当处理泉水中 F 之后,可开发成大型矿泉水水源地。

6 结论

(1)昭觉地区富含 H_2SiO_3 ($\geq 25 \text{ mg/L}$) 地下水均属于偏碱性低矿化度优质地下水,分布在基底岩石为玄武岩的 6 个片区,分布面积约 79 km^2 ,占昭觉县国土面积 2.9%。

(2)昭觉地区玄武岩地下水存在 HCO_3^- -Ca、 HCO_3^- -Ca·Mg、 HCO_3^- -Ca·Na、 HCO_3^- -Ca·Mg·Na、 HCO_3^- -Na 等 5 种水化学类型,总体以 HCO_3^- -Ca·Mg 为主,其次为 HCO_3^- -Ca,再次为 HCO_3^- -Ca·Na,三者分别占总采样点数的 50.00%、25.76%、12.12%。

(3)昭觉地区富 H_2SiO_3 地下水的形成主要受水岩相互作用程度、硅酸盐矿物的分布范围及其可溶性、围岩裂隙发育程度、水源涵养及补给条件等四方面因素影响,其中大气降水入渗-径流过程中存在长时间的水岩作用为地下水 H_2SiO_3 富集提供了水动力条件,玄武岩及其气孔充填物中的长石、辉石等矿物为地下水中 H_2SiO_3 富集提供了物源条件,玄武岩较为发育的柱状节理裂隙、风化裂隙及构造裂隙为地下水中 H_2SiO_3 富集提供了良好的储水和导水系统,起伏的地形条件及较为茂盛的灌木植被为地下水中 H_2SiO_3 富集提供了水源涵养和补给条件;另外,较高的地下水温度 $T_{\text{水}}$ 有利于水岩作用过程向 H_2SiO_3 增多的方向进行。

(4)在后续工作过程中,需进一步揭示影响昭觉地区地下水中 H_2SiO_3 分布与迁移的主要因素,科学有序开发偏碱性低矿化度富偏硅酸地下水。

致谢:参与该项研究的还有裴建国、李兆林、李青松、武美玲、唐薇薇、陈秋明、肖周兴、严胜强等。中国地质科学院岩溶地质研究所有关领导和专家对该项研究给予了大力支持与指导帮助,谨一并致以谢忱!

References

- Ai Yao, Gao Ming, Dai Shuihan. 1998. Numerical simulation of water-rock interaction in basalt area[J]. Hydrogeology &

- Engineering Geology, 25(3): 11–13,15,18 (in Chinese with English abstract).
- Chen Changliang. 2015. Study on the Reserve Regularity and Hydrochemical Characteristics of Geothermal Resources in Changbai Mountain Basalt Region[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract)
- Dafny E, Burg A, Gvirtzman H. 2006. Deduction of groundwater flow regime in a basaltic aquifer using geochemical and isotopic data: The Golan Heights, Israel case study[J]. Journal of Hydrology, 330(3/4): 506–524.
- Dang Zhi, Hou Ying. 1995. Experimental study on the dissolution kinetics of basalt–water interaction[J]. Acta Petrologica Sinica, 11(1): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- Hu Deyong, Tao Xiaolang, Cui Yunxiang, Kuang Jing, Yang Kai, Zhang Bingqiang. 2017. Distribution of high–quality spring in the emeishan basalt in Lochang, Panxian, Guizhou[J]. Journal of Sichuan Geologica, 42(5): 821–831 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhongcheng. 1998. Features of epikarst zone in south china and formation mechanism[J]. Tropical Geography, 18(4): 322–326 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhongcheng, Yuan Daoxian. 1999. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources[J]. Acta Geoscientia Sinica, 20(3): 302–308 (in Chinese with English abstract).
- Koh Dongchan, Genereux David P, Koh Giwon, Ko Kyungseok. 2017. Relationship of groundwater geochemistry and flow to volcanic stratigraphy in basaltic aquifers affected by magmatic CO₂, Jeju Island, Korea[J]. Chemical Geology, 467(1): 143–158.
- Lassaad Dassi. 2011. Investigation by multivariate analysis of groundwater composition in a multilayer aquifer system from North Africa: A multi–tracer approach[J]. Applied Geochemistry, 26(8): 1386–1398.
- Li Changnian. 1986. Petrology and genesis of Emei basalt in Panxi rift zone, Sichuan Province [J]. Earth Science, 7(6): 577–584 (in Chinese with English abstract).
- Li Qi. 2015. The Characteristic and Genesis of Mineral Assemblages in the Amygdaloidal in Basalt of Sichuan and Yunnan Province[D]. Guilin: Guilin University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoni, Zhou Changsong, Zhou Xiaode, Feng Minquan. 2014. Study on risk assessment of groundwater pollution in sewage irrigation area [J]. Journal of Hydrological Engineering, 45(3): 326–334, 342 (in Chinese with English abstract).
- Ruan Wei. 2018. Study on the Origin of Mineral Water in Permian Basalt Area of Kunming [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology (in Chinese with English abstract)
- Shan Tingting, Xu Shiguang, Fan Zhuguo, Ruan Wei. 2019. Characteristics and formation mechanism of metasilicate mineral water in Xishan mountain of Kunming [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 44(2): 39–47 (in Chinese with English abstract).
- Shang Ziqi. 2019. A Study of the Hydrochemical Characteristics and Genesis of the Springs in Basalt in the Leiqiong Region [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Shen Zhaoli, Wang Yanxin. 2002. Review and outlook of water–rock interaction studies [J]. Earth Science–Journal of China University of Geosciences, 27(2): 127–133 (in Chinese with English abstract).
- Su Chunli, Zhang Ya, Ma Yanhua, Liu Wenbo. 2019. Hydrochemical evolution processes of karst groundwater in Guiyang City: Evidences from hydrochemistry and ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios [J]. Earth Science, 44(9): 327–334 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Mao Qigui, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Xi Yuze. 2018. Hydrogeochemical characteristics and formation evolutionary mechanism of the groundwater system in the Hami basin [J]. Geology in China, 45(6): 1128–1141 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Li Duojie, He Zexin, Li Jian. 2020. Formation mechanism and geological construction constraints of metasilicate mineral water in Yudaokou Hannuoba Basalt Area [J]. Earth Science, 45(11): 4236–4253 (in Chinese with English abstract)
- Sun Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming, Ma Shimin, Li Lijun. 2017. The discovery of silicic acid and strontium enrichment areas in groundwater of Changchun area, Jilin Province [J]. Geology in China, 44(5): 1031–1032 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qifa, Tian Hui, Guo Xiaodong, Yu Huiming. 2019. Strontium–enriched areas discovered in Lianhuashan, Changchun [J]. Geology in China, 46(2): 430–431 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jie, Xu Wenliang, Li Yu, Sun Chenyang. 2019. Composition variations of mesozoic and cenozoic basalts in northern great Xing’ an Range: Implications for thermal evolution of mantle [J]. Earth Science, 44(4): 1096–1112 (in Chinese with English abstract).
- Wang Juan, Han Wei. 2000. Trace elements in natural mineral water and human health [J]. Studies of Trace Elements and Health, 18(2): 77–78 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junyu, Wang Jiale, Jin Menggui. 2017. Hydrochemical characteristics and formation causes of karst water in Jinan spring catchment [J]. Earth Science, 42(5): 821–831 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhoufeng, Hao Ruijuan, Yang Hongbin, Wang Wenke, Yang Shengke. 2015. Research progress on water–rock interaction [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 26(3): 210–216 (in Chinese with English abstract).
- Xia Riyuan. 2016. Groundwater resources in Karst area in Southern China and sustainable utilization pattern [J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 4(4): 301–309.

- Yan Baizhong, Xiao Changlai, Liang Xiujuan, Wu Shili. 2016. Hydrogeochemical tracing of mineral water in Jingyu County, Northeast China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 38(1): 291-307.
- Yan Jinxu. 1993. Distribution and genesis of partial silicate mineral water in North Zhejiang [J]. Coal Geology of China, 5(4): 47-51, 57 (in Chinese with English abstract).
- Yao Jinmei, Zhou Xun, Li Juan, Dai Wenyu, Kang Xinghong. 2007. Hydrogeochemical characteristics and evolution simulation of groundwater in basalts on the Leizhou Peninsula, Guangdong, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(3): 327-334 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Changsong, Zou Shengzhang, Zhu Danni, Xie Hao. 2018. Pollution pattern of underground river in karst area of the Southwest China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 6(2): 71-83.
- Zhou Changsong, Zou Shengzhang, Xia Riyuan, Xue Qiang, Zhu Danni, Li Lujuan, Cao Jianwen, Li Jun, Xie Hao. 2021. The discovery of superconcentration of strontium in surface and groundwater bodies of Guanling area, Guizhou Province [J]. Geology in China, 48(3): 663-664(in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 艾瑶,高明,戴水汉. 1998. 玄武岩地区水-岩作用的数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 25(3): 11-13, 15, 18.
- 陈昌亮. 2015. 长白山玄武岩区地热资源赋存规律及其水化学特征研究[D]. 长春:吉林大学.
- 党志,侯瑛. 1995. 玄武岩-水相互作用的溶解机理研究[J]. 岩石学报, 11(1): 9-15.
- 胡德勇,陶小郎,崔云祥,况靖,杨侃,张兵强. 2017. 峨眉山玄武岩地区优质泉水分布规律研究[J]. 四川地质学报, 37(4): 625-628.
- 蒋忠诚. 1998. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理[J]. 热带地理, 18(4): 322-326.
- 蒋忠诚,袁道先. 1999. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 20(3): 302-308.
- 李昌年. 1986. 四川攀西裂谷带峨眉玄武岩的岩石学及其成因研究[J]. 地球科学, 11(6): 577-584.
- 黎琪. 2015. 川滇峨眉山玄武岩杏仁体中矿物共生组合特征及成因[D]. 桂林:桂林理工大学.
- 李小牛,周长松,周孝德,冯民权. 2014. 污灌区浅层地下水污染风险评估研究[J]. 水利学报, 45(3): 326-334, 342.
- 阮巍. 2018. 昆明市二叠系玄武岩地区矿泉水成因研究[D]. 昆明:昆明理工大学.
- 单婷婷,徐世光,范柱国,阮巍. 2019. 昆明西山偏硅酸矿泉水特征及形成机理[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 44(2): 39-47.
- 尚子琦. 2019. 雷琼地区玄武岩泉水水化学特征及成因分析[D]. 北京:中国地质大学(北京).
- 沈照理,王焰新. 2002. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 27(2): 127-133.
- 苏春利,张雅,马燕华,刘文波. 2019. 贵阳市岩溶地下水水化学演化机制:水化学和锶同位素证据[J]. 地球科学, 44(9): 327-334.
- 孙厚云,毛启贵,卫晓锋,张会琼,蕙玉泽. 2018. 哈密盆地地下水系统水化学特征及形成演化[J]. 中国地质, 45(6): 1128-1141.
- 孙厚云,卫晓锋,孙晓明,贾凤超,李多杰,何泽新,李健. 2020. 御道口汉诺坝玄武岩偏硅酸矿泉水形成机制及其地质建造制约[J]. 地球科学, 45(11): 4236-4253.
- 孙岐发,田辉,郭晓东,于慧明,马诗敏,李丽君. 2017. 吉林长春地区地下水中发现偏硅酸和锶富集区[J]. 中国地质, 44(5): 1031-1032.
- 孙岐发,田辉,郭晓东,于慧明. 2019. 长春莲花山发现锶富集区[J]. 中国地质, 46(2): 430-431.
- 唐杰,许文良,李宇,孙晨阳. 2019. 大兴安岭北段中-新生代玄武岩成分变异:对地幔热演化过程意义[J]. 地球科学, 44(4): 1096-1112.
- 王娟,韩薇. 2000. 天然矿泉水中微量元素与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 18(2): 77-78.
- 王珺瑜,王家乐,靳孟贵. 2017. 济南泉域岩溶水水化学特征及其成因[J]. 地球科学, 42(5): 821-831.
- 王周锋,郝瑞娟,杨红斌,王文科,杨胜科. 2015. 水岩相互作用的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 26(3): 210-216.
- 严金叙. 1993. 浙北地区偏硅酸型矿泉水分布与成因分析[J]. 中国煤田地质, 5(4): 47-51, 57.
- 姚锦梅,周训,李娟,戴文育,康星洪. 2007. 广东雷州半岛玄武岩地下水水文地球化学特征及演化模拟[J]. 地质通报, 26(3): 327-334.
- 郑小敏,曹俊,沈洪江. 2015. 昭觉县幅1:5万区域地质图说明书[R]. 西昌:四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队.
- 周长松,邹胜章,夏日元,薛强,朱丹尼,李录娟,曹建文,李军,谢浩. 2021. 贵州关岭地区发现地表和地下水水体锶超常富集[J]. 中国地质, 48(3): 663-664.