

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.198

引用格式: 祁泽学, 张吉廷, 何胜, 等. 青海湖南部贵南地区天然矿泉水形成机制[J]. 中国地质调查, 2025, 12(3): 75–84.
(Qi Z X, Zhang J T, He S, et al. Formation mechanism of natural mineral water in Guinan area of the southern Qinghai Lake[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3): 75–84.)

青海湖南部贵南地区天然矿泉水形成机制

祁泽学¹, 张吉廷¹, 何胜^{1*}, 张永兴¹, 张国强², 赵生军²

(1. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810012; 2. 青海省环境地质勘查局, 青海 西宁 810000)

摘要: 贵南地区地处黄河上游龙羊峡段水源涵养功能区, 矿泉水资源十分丰富, 研究程度较低, 基本处于未开发利用的天然状态, 且研究区内部分村镇饮用水困难, 研究矿泉水的赋存分布与形成机制对区内矿泉水可持续开发利用及解决分散村镇居民饮水问题具有重要意义。采用统计分析、水化学同位素等图解分析方法, 系统梳理研究区矿泉水的分布特征, 从水化学、同位素及围岩微量元素背景值等方面综合探讨锍型天然矿泉水的成藏机制。结果表明: 贵南地区地下水体中 Sr 含量为 0.42 ~ 2.46 mg/L, 平均含量为 0.92 mg/L, 整体属于弱碱性锍型矿泉水; 水化学组分主要受水-岩相互作用控制, 区域岩石中高 Sr 的背景值为矿泉水的形成提供了物质来源, 高度发育的基岩裂隙为矿泉水的形成提供了良好的运移空间。研究成果可解决部分居民用水困难, 为后续矿泉水资源可持续开发利用提供定向靶区, 助力青海省矿泉水高质量发展。

关键词: 青海湖南部; 锍型矿泉水; 成因机制; 水文地质调查

中图分类号: P641.134

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)03-0075-10

0 引言

泉是地下水的天然露头, 一般在地下水面与地形的切割点或受构造等的影响, 以单泉或者泉群的形式涌出地表^[1]。天然矿泉水是泉的特殊类型, 其形成过程中水体与围岩发生相互作用, Sr 等有益于人体的微量元素逐渐富集后自然出露而成。随着天然矿泉水研究的不断深入, Sr 等微量元素对人体健康的影响逐渐清晰^[2-3]。

为揭示锍型矿泉水的形成过程及机制, 众多学者对水体中 Sr 的富集环境、水文地球化学特征及构造特征等进行了研究^[4-8]。祁泽学等^[9-10]通过对柴达木盆地南缘、东北缘典型锍型矿泉水同位素、水化学及构造特征等的分析, 发现该区域矿泉水受水-岩相互作用影响, 充分融滤围岩中的 Sr

后通过构造裂隙逐渐汇集富集, 遇压扭性阻水断裂后沿破碎带在断层上盘面状出露。易晓明等^[11]系统统计了湖南省 417 处矿泉水的水化学特征, 发现锍型矿泉水在湖南省内分布广泛, 并对典型泉的分布规律及形成机制进行了总结。张彦林等^[12]通过对甘肃省 644 个水点的样品开展检测分析, 指出围岩中的 Sr 丰度决定地下水中 Sr 的含量。然而, 针对青海省典型天然矿泉水的成因机制研究尚处于起步阶段, 尤其在青海湖南部的贵南地区更为缺乏, 不利于青海湖地区矿泉水高质量发展。

本文以贵南地区天然矿泉水为研究对象, 通过地质-水文地质调查、水样检测、泉水动态监测及大地电磁测深等手段, 基于水化学、同位素分析, 综合地质-水文地质特征及天然矿泉水的补径排条件, 对研究区天然矿泉水的成藏机制综合分析。研究成果可为进一步探寻青海湖南部可供开发利用的锍型矿泉水潜

收稿日期: 2024-04-22; 修订日期: 2024-09-04。

基金项目: 中国地质调查局“柴达木盆地盐湖生态综合调查(编号: DD20220958)”项目资助。

第一作者简介: 祁泽学(1990—), 男, 高级工程师, 主要从事地下水资源详查、水源地勘探及矿泉水勘查等工作。Email: qzx13639722055@126.com。

通信作者简介: 何胜(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质物探工作。Email: 395579229@qq.com。

力区,打造青海省高端矿泉水品牌提供靶向目标及基础依据,助力青海省矿泉水产业高质量发展。

1 研究区概况

研究区隶属于青海省贵南地区,位于青海湖盆地南部龙羊峡附近(图 1),属典型高原大陆性气候,多年平均气温 -2.3℃,多年平均降雨量 350~

400 mm,降水多集中在 5—9 月。区内水系有一定程度的发育,分布范围较大的河流有塔秀沟河、茫拉河等^[13]。区内地下水主要源于大气降水及南部山区基岩裂隙水的补给,主要供水水源为东南侧卡加水库供水,由于供水水源单一,供水路线较长,无法满足西侧大部分村镇全年的用水需求,因此,对该地区不同地貌单元矿泉水的分析可为相近村镇引泉供水提供基础参考。

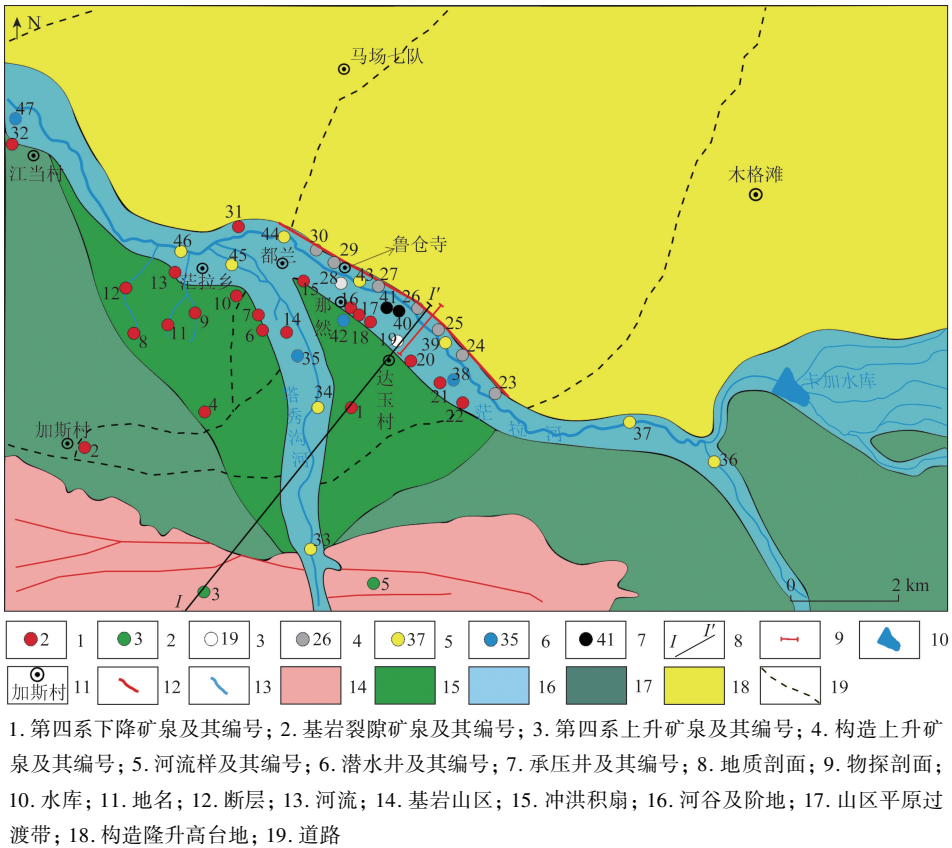


图 1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Location of the study area and distribution of the sampling points

研究区地层岩性主要为三叠系(T)长石砂岩夹板岩及多层灰岩、新近系(N)砂岩夹泥岩及第四系全新统冲洪积物(Q_4^{al+pl})、上更新统冲洪积物(Q_3^{al+pl})和下更新统湖泊-河流相堆积物(Q_1^{l+al})。主要含 Sr 地层为南部基岩区三叠系(T)长石砂岩夹板岩夹多层灰岩及北部大面积下更新统湖泊-河流相(Q_1^{l+al})的泥质砂砾石、泥质砂卵砾石,区内区域构造展布方向主要为 NWW 向,分布于贵南南山北缘及茫拉河一带。

研究区锇型矿泉水大量出露,根据出露条件可分为 4 类:基岩裂隙矿泉、第四系下降矿泉、第四系上升矿泉及构造上升矿泉,按地貌单元依次出露于基岩山区、塔秀沟冲洪积扇及茫拉河区。基岩山区

矿泉水多呈点状出露,见图 1 中 3 号、5 号泉,单泉流量为 0.87~1.83 L/s, Sr 含量为 0.42~0.68 mg/L。塔秀沟冲洪积扇区矿泉水主要分布在深切冲沟谷边缘及茫拉河 I、II 级阶地,沿着地下水的切割面线状溢出,第四系下降矿泉单泉流量为 0.85~92.0 L/s (其中单泉流量为 0.85~10 L/s 的共计 9 个,泉水编号分别为 1、2、4、6、7、9、11、12、32;单泉流量为 10~40 L/s 的共计 9 个,泉水编号分别为 10、13、15、17、18、20、21、22; 16 号呈泉群形式大量溢出,流量达 92 L/s), Sr 含量为 0.42~1.5 mg/L; 第四系上升矿泉出露于茫拉河谷南岸,泉水大量面状溢出,呈现冒泡涌砂现象,水温相较于下降矿泉明显增加,后汇入

茫拉河, 泉流量为 14.3 ~ 58.3 L/s (泉水编号为 19、28); 构造上升矿泉主要出露与茫拉河北岸的木格滩构造隆升下, 单泉流量为 0.5 ~ 2.6 L/s (泉水编号为 23 ~ 27, 29 ~ 30), Sr 含量为 0.5 ~ 2.46 mg/L。研究区矿泉水 Sr 含量全部达到《GB 8537—2018 食品安全国家标准饮用天然矿泉水》^[14] 指标要求。《青海省贵南地区城区饮用天然矿泉水调查评价专题报告》^[15] 结论显示贵南地区矿泉水允许开采量达到 11 296.46 m³/d。

2 研究方法

2.1 样品采集与检测

水样采集及检测严格遵循相关规范^[16-17] 要求, 共采集水样 40 组, 测试项目包括矿泉水微量离子含量、常规离子含量、D、¹⁸O 稳定同位素等, 采样点位置见图 1。样品采集完成后及时送至青海省水文地质工程地质环境地质调查院检测中心进行检测, 其中常规离子及矿泉水微量离子由电感耦合等离子体发射光谱仪进行测定, 测定完成后通过阴阳离子平衡检验, 水化学数据相对误差控制在 5% 以内, 分析结果经闭合差计算检验, 误差符合规定。同位素采用的仪器为 PICARROL2130-i 水同位素分析仪, 测试结果以相对维也纳标准平均海洋水 VSMOW 的千分偏差值 (‰ VSMOW) 表示, D 和 ¹⁸O 的精度分别为 0.25% 和 1.6%。地球物理勘探采用 Aether 大地电磁仪, 完成 MT 测量物理点 20 个, 质检点 3 个, 质检率 15%, 符合《DZ/T 0173—2022 大地电磁测深法技术规程》^[18] 要求。

2.2 方法简述

本文采用 Piper 三线图、Gibbs 图解法及稳定同位素等方法分析矿泉水水文地球化学特征, Piper 三线图是揭示水体水文地球化学信息的重要方法^[19], 采用 AquaChem 软件绘制, Gibbs 图解是通过构建 Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺) 或 Cl⁻/(Cl⁻ + HCO₃⁻) 与总溶解固体 (total dissolved solids, TDS) 间的关系^[20], 来判断水体中可溶性离子的主要来源, 采用 Origin 2024 软件绘制。大地电磁测深法是将天然交变电磁场为场源, 将时间域的信号转换为频率域信号, 再通过不同频率的视电阻率及相位等参数综合分析, 发挥场源频带范围宽的优势, 探测底层深部相关信息。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征

3.1.1 水化学组分分析

贵南地区地表水和矿泉水化学组成测试结果显示该地区河水 pH 值为 6.85 ~ 8.17, 平均值为 7.88, TDS 值为 196.7 ~ 378.52 mg/L, 平均值为 302.38 mg/L; 矿泉水 Sr 含量为 0.42 ~ 2.46 mg/L, 整个地下水系统 Sr 含量全部达标, pH 值为 6.19 ~ 8.01, 平均值为 7.45, TDS 值为 128.89 ~ 696.18 mg/L, 平均值为 448.94 mg/L。地表水与矿泉水大多呈弱碱性, TDS 值均较小, 但矿泉水的 TDS 值较地表水略高, 表明矿泉水在地下径流过程中经历了较长时间的径流, 其过程中与围岩进行了较为充分的水-岩相互作用, 溶滤了围岩中的部分矿物成分 (表 1)。

表 1 研究区地表水与地下水水化学指标

Tab.1 Hydrochemical indexes of surface water and groundwater in the study area

测试项目	地表水 (河水)				矿泉水			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
pH 值	8.17	6.85	7.88	0.31	8.01	6.19	7.45	0.41
TDS/(mg · L ⁻¹)	378.52	196.70	302.38	52.23	696.18	128.89	448.94	255.23
Na ⁺ + K ⁺ /(mg · L ⁻¹)	58.36	1.62	22.05	14.18	127.62	3.65	38.61	35.29
Ca ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	521.00	42.08	92.43	111.10	236.47	24.05	79.53	44.80
Mg ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	29.16	10.94	18.91	5.36	136.08	4.86	31.85	27.69
Cl ⁻ /(mg · L ⁻¹)	31.91	14.18	22.82	5.46	262.33	10.64	58.21	59.62
SO ₄ ²⁻ /(mg · L ⁻¹)	146.76	14.49	44.44	29.96	207.88	6.47	81.93	64.39
HCO ₃ ⁻ /(mg · L ⁻¹)	347.81	152.55	240.27	46.56	652.91	47.81	264.58	128.00
Sr ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	0.49	0.22	0.28	0.96	2.46	0.42	0.92	0.49

从主量离子分析, 地表水和矿泉水阳离子含量依次为 Ca²⁺ > Na⁺ + K⁺ > Mg²⁺, 阴离子含量依次为 HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻, 阴阳离子含量排序一致, 间接反映了该区域地表水与地下水相互补给, 矿泉水未经

过较深的循环。矿泉水微量离子检测发现, 区内所有已调查的 32 个矿泉水点 Sr 含量为 0.42 ~ 2.46 mg/L, 超过国家饮用天然矿泉水中 Sr 含量不小于 0.4 mg/L 的要求^[14] (图 2), 该地区矿泉水属于较

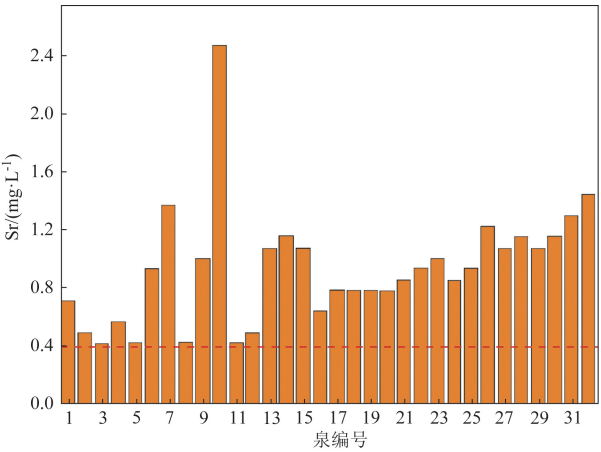


图 2 研究区矿泉水中 Sr 含量

Fig.2 Strontium content of mineral spring in the study area

优质的天然锶型矿泉水。Sr 含量在塔秀沟冲洪积扇地区呈现从扇后缘向前缘逐渐增加,从扇两翼向中轴部逐渐增加的特征,受南北两岸高 Sr 矿泉水汇入影响,茫拉河水 Sr 含量呈现偏高的现象。

Piper 三线图(图 3)显示,基岩裂隙矿泉水、第四系矿泉水与河水阳离子呈现 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} + \text{K}^{+} >$

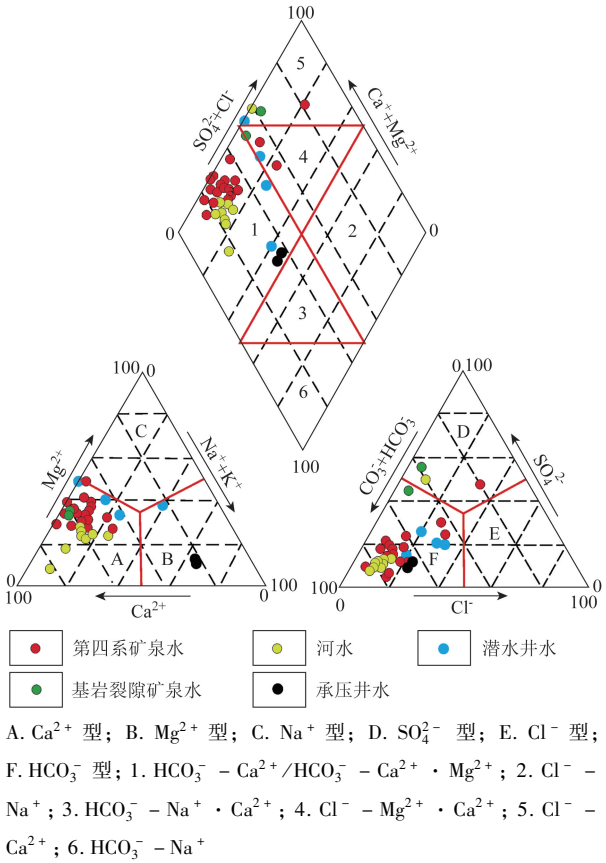


图 3 研究区主要水体 Piper 三线图

Fig.3 Piper trilinear diagram of main water bodies in the study area

Mg^{2+} 的规律,阴离子含量依次为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$,阴离子以 HCO_3^- 占主导,反映了该区域碱土金属离子远远大于碱金属离子,弱酸根大于强酸根,碳酸盐硬度为 50% ~ 60% 的特征,直观体现为矿泉水呈现弱碱性,水化学类型主要为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型或 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型。基岩裂隙矿泉水、第四系矿泉水与地表水体在 Piper 三线图中的位置基本一致,具有高 Ca^{2+} 、低 Na^{+} 、低 K^{+} , HCO_3^- 占主导的特征,表明了三者具有相同的补给源,且部分区域矿泉水与地表水之间相互补给、相互转化。构造上升矿泉水与潜水井水较之第四系矿泉水及基岩裂隙矿泉水,阳离子中的 K^{+} 、 Na^{+} 含量变高,阴离子中 Cl^- 含量逐渐变大,反映了地下水在接受基岩裂隙水的及矿泉水的补给后经历了一定了循环演化过程,溶滤了围岩中的部分矿物成分,水化学类型为逐渐由 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型或 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型变为 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+}$ 型或 $\text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} \cdot \text{Mg}^{2+}$ 型。承压井水在 Piper 阳离子分区的 B 区,与其余水样对比有明显差异,水中阳离子 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 含量占主导,水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^{+}$ 型,间接反映了承压井水经过了更深的循环过程,承压井水 TDS 值为 298 ~ 308 mg/L, pH 值为 8.37 ~ 8.45,水化学类型、pH 值与其余水体存在明显差异。

3.1.2 水化学控制机制

根据水体径流的过程中水化学组分的影响因素,可将研究区水化学控制类型分为降水主导型、水-岩相互作用主导型及蒸发-浓缩主导型 3 种类型^[9-10]。研究区矿泉水 Gibbs 图解显示,区内水体水化学组分整体受水-岩相互作用控制(图 4)。较之于河水,矿泉水 TDS 值呈现出较高的趋势,表明矿泉水在含水层中经历了较为充分的水-岩相互作用,溶滤了围岩的矿物成分。基岩山区主要岩性为三叠系细砂岩、粉砂岩及砂岩,矿物成分为长石、石英、云母,夹杂的灰岩矿物成分主要为方解石,其中 Sr 含量比地壳含量泰勒值^[21]高,矿物岩层裂隙接受大气降水补给后沿基岩裂隙汇集、径流,循环过程中与水体相互作用,溶解了其中的部分 Sr,该过程是矿泉水中 Sr 的重要来源,基岩区出露矿泉水点 Sr 含量达到 0.44 mg/L。基岩裂隙泉水补给第四系泉水后,在地下水流系统中逐渐汇集,此时第四系泉水中 Sr 含量达到 0.49 mg/L,此后地下水在岩性为含钙质结核的泥质砂砾石、泥质砂卵

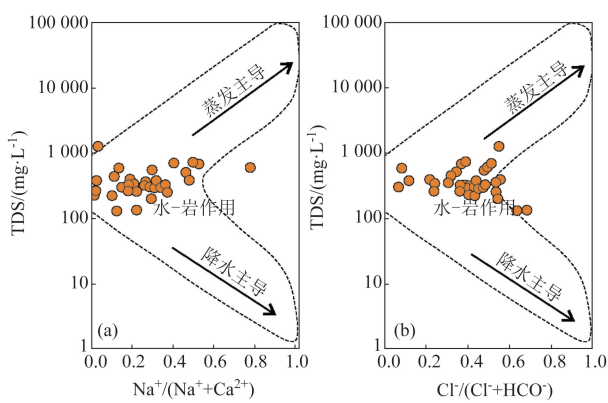


图4 研究区矿泉水 Gibbs 图解

Fig.4 Gibbs diagram of mineral spring in the study area

砾石的全新统冲洪积物中继续运移,该过程中溶解了钙质结核等矿物中的 Sr, Sr 含量进一步增加至 0.58 mg/L。南部扇区大量矿泉水汇集运移至茫拉河处,受河流阶地切割控制,沿地下水面与切割点处大量出露,汇流至茫拉河,河水的 Sr 含量达到 0.41 mg/L,这与区域 Sr 含量较高的背景值和水-岩相互作用密不可分。

3.1.3 同位素特征

同位素能快速揭示水体的补给来源,判断地下水径流过程路径,揭示水循环过程中所经历的水文演化过程和水岩作用^[22-23]。图5显示各水体稳定同位素均在当地大气降水线 $\delta D = 8.69\delta^{18}O + 17.5$ ^[24] 附近,表明区内水体均直接或者间接接受大气降水的补给,基岩裂隙矿泉、第四系矿泉、井水、塔秀沟河水均在大气降水线附近,表明直接接受大气降水的补给,第四系上升矿泉及井水较之基

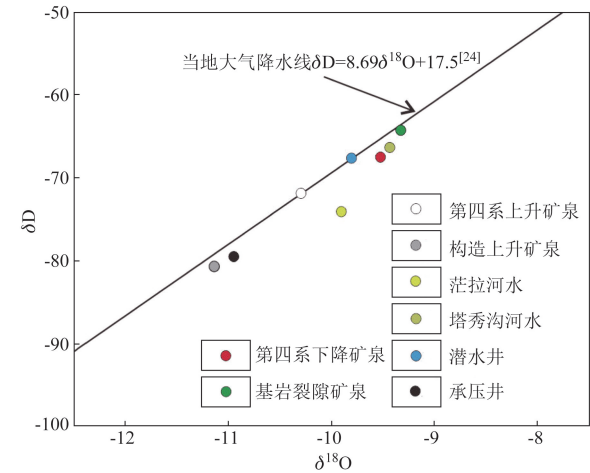


图5 研究区各水体 $\delta^{18}O$ 与 δD 关系

Fig.5 Relationship between δD and $\delta^{18}O$ in each water body in the study area

岩裂隙矿泉及塔秀沟河水偏低,靠近大气降水线的左下,表明经历了一定程度的循环运移。承压井及构造上升矿泉位置较接近,与其他水体相比,同位素明显偏低,均在大气降水线的左下方,说明该类水体不是直接接受大气降水的就近补给,而是经历了更长时间和更深的循环演化;茫拉河河水与其余水体相比较存在轻微的 $\delta^{18}O$ 漂移,是由于各类水体汇入茫拉河后在径流过程中进行了更为充分的水-岩相互作用。

3.2 矿泉水成因机制

根据矿泉出露时地质-水文地质条件的不同,可将研究区矿泉水分为4类:基岩裂隙型矿泉、第四系下降型矿泉、第四系上升型矿泉及构造上升型矿泉。现从矿泉水出露条件、物质来源分析矿泉水的成因机制。

3.2.1 矿泉水出露条件

基岩裂隙型矿泉主要出露于研究区南部南山地区,该区海拔 3 500 m 以上分布着季节性冻土,冬季大量冰雪附着其上,区内基岩构造裂隙较为发育,为大气降水及季节性冰雪融水垂向入渗提供了良好的补给环境,开春气温逐渐升高季节性的冻土层逐渐融化沿裂隙补给地下水,至夏季时大气降水同时沿裂隙补给,形成基岩裂隙水,在山间沟谷切割地下水面部位溢出地表,形成矿泉水(图6),该类型泉点多点状溢出。该区矿泉水受季节性降水变化影响,流量为 0.87 ~ 1.83 L/s,流量波动较大(图7),冬季大多干枯,春季开始溢出。泉附近加斯村无固定的取水水源,可通过扩泉引水,将基岩区泉水引至高位水池进行春夏季供水。

第四系下降型矿泉主要出露于塔秀沟冲洪积扇冲沟深切部位,茫拉河 I、II 级阶地深切塔秀沟冲洪积扇地段。塔秀沟冲洪积扇区季节性冲沟较为发育,较大的有龙洼前马沟、居拉修马沟等,切深达 100 m,茫拉河 I、II 级阶地横向切割塔秀沟冲洪积扇,深达 50 ~ 200 m,地下水在接受南部侧向径流补给后,随地势逐渐向北运移,在地下水位与切割面的交汇处矿泉片状大量溢出(图6),由于切割深度较大,该部位上更新统中的水基本排泄疏干。该类矿泉流量、水温相对较稳定(图8),经历了一定深度的循环过程,可为茫拉河谷左岸那然村、下江当村及都兰村等提供较为稳定的供水水源。

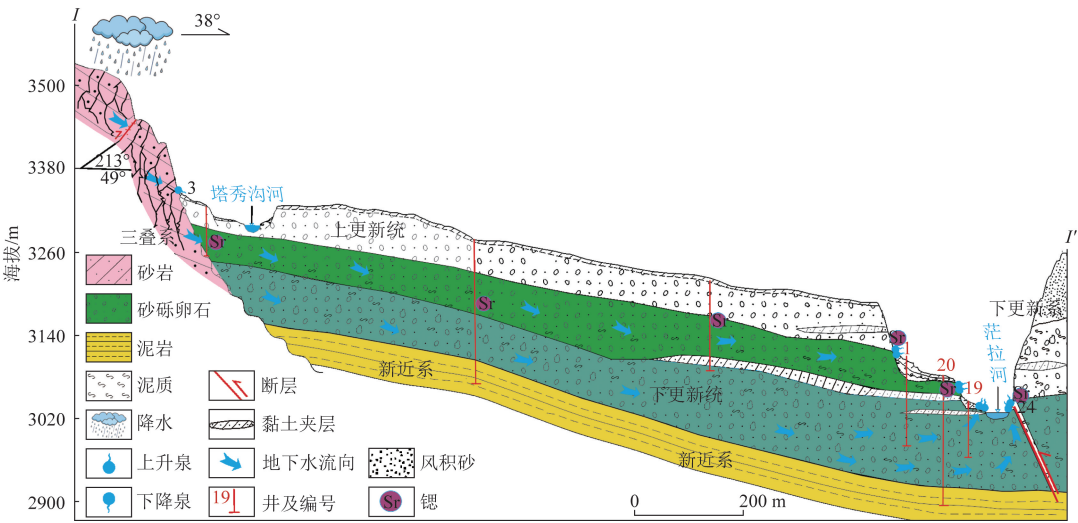


图 6 研究区矿泉水成因示意图

Fig. 6 Genesis diagram of mineral spring in the study area

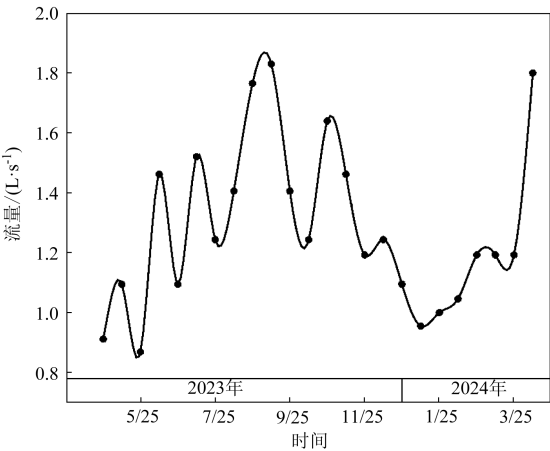


图 7 3 号基岩裂隙矿泉流量动态

Fig. 7 Flow dynamics of mineral spring in bedrock fissure of No. 3 spring

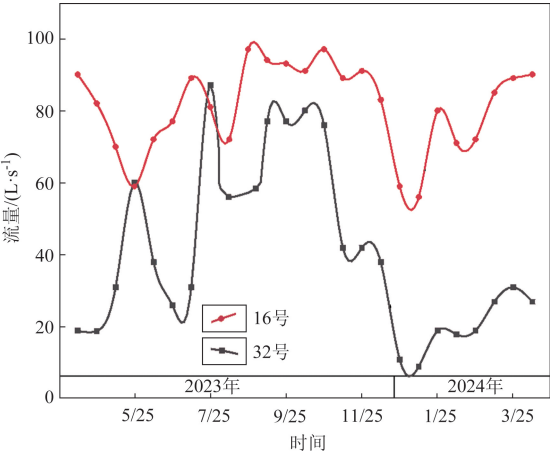


图 8 第四系下降矿泉流量动态

Fig. 8 Flow dynamics of Quaternary descending mineral spring

第四系上升型矿泉主要出露于茫拉河 I 级阶地及河漫滩南岸,地下水在接受大气降水、季节性冰雪融水的补给后进入第四系含水层向北运移,至冲洪积扇前缘下更新统时受地层泥质含量增加,在上更新统与下更新统接触面逐渐形成了厚约 20 m 的黏土层,形成隔水顶板。茫拉河 I 级阶地及河谷深度切割,揭穿含水层隔水顶板,地下水沿着切割面大量片状溢出,形成第四系上升矿泉(图 6),流量较为稳定(图 9),呈现冒泡涌砂,冬季不结冰等现象。

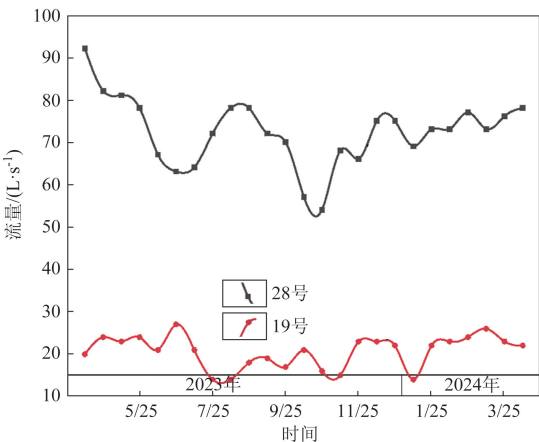


图 9 第四系上升矿泉流量动态

Fig. 9 Flow dynamics of Quaternary ascending mineral spring

为探究茫拉河北岸出露构造上升型矿泉水与构造的关系,横跨茫拉河北岸至木格滩地区,开展了 4 km 的 MT 大地电磁测深法测深(图 10)。结果显示,在茫拉河北侧,出现条带状低阻异常区,横

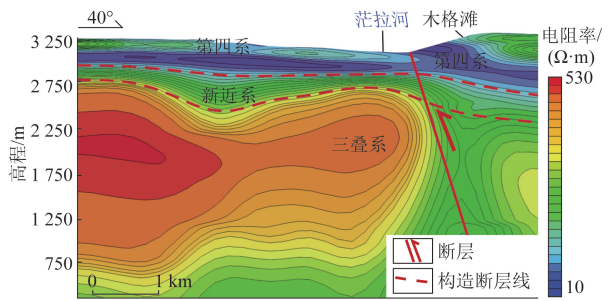


图 10 上升矿泉附近 MT 反演图(据文献[25]修改)
Fig.10 MT inversion map near the ascending spring
(modified after reference [25])

向错断不连续,且该处相位横向也不连续,推测在该处发育有断层,下部向北倾斜,倾角近似直立,下延深度超出探测范围,上盘相对上升,下盘相对下降,推测为压扭性逆断层,破碎带宽度约 100 m^[25]。地下水在接受南部侧向径流补给后,逐渐向北径流,期间充分与下更新统中的砂砾石、钙质结合等接触,发生水 – 岩相互作用,在含水层中滞留了较长时间,继续运移至茫拉河北侧压扭性构造后受阻,沿着破碎带向上径流,在茫拉河北岸河水侵蚀揭露破碎带部位大量溢出(图 6)。该类泉呈现明显的涌沙、冒泡、冬季水草茂盛等现象,泉水无色透明、水温为 10.2 ~ 13.8 ℃,单泉流量为 0.9 ~ 2.5 L/s(图 11),水温流量稳定,TDS 值为 0.1 ~ 0.2 g/L,与南岸泉水(水温 5.1 ~ 8.6 ℃)相比,水温明显异常。

3.2.2 矿泉水水源分析

利用端元法可分析地下水化学演化过程中岩石风化物的来源,自然界主要岩石风化物可分为蒸

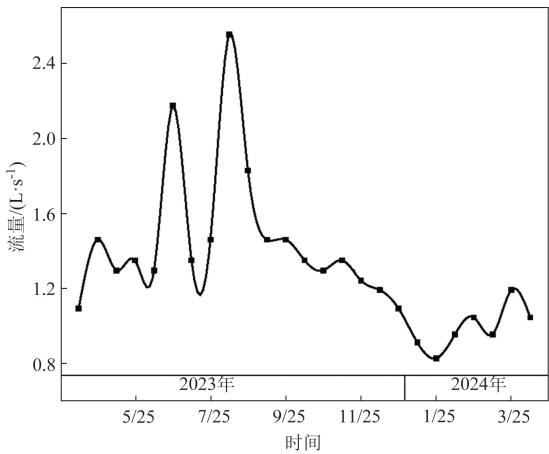
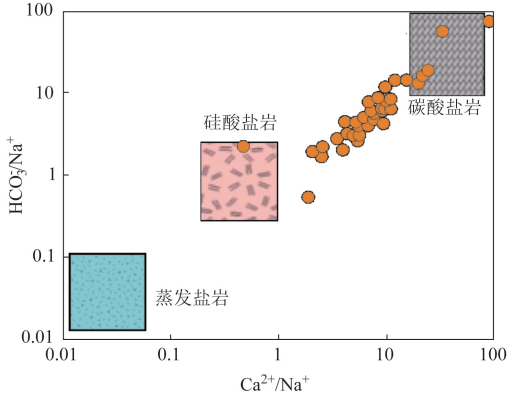
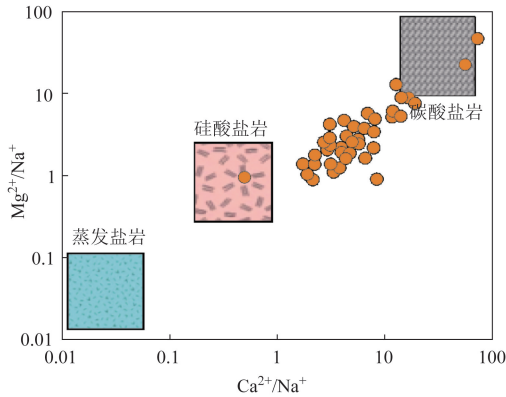


图 11 26 号构造上升矿泉流量动态
Fig.11 Flow dynamics of structural ascending spring of No.26 spring

发岩、硅酸盐和碳酸盐^[26]。研究区矿泉水离子比值在端元图中位于硅酸盐岩附近,表明矿泉水主要水化学离子组分主要源于硅酸岩盐与地下水的水 – 岩相互作用(图 12)。研究区基岩岩性主要以砂岩中的长石、石英、云母等硅酸盐以及灰岩中的方解石等碳酸盐为主,基岩区 Sr 含量处于最高状态(表 2),比地壳含量泰勒值^[21]高 1.6 ~ 6.03 倍,为矿泉水的形成提供了良好的物质来源。地下水在含 Sr 较高的矿物岩构造裂隙中汇集运移,充分与围岩接触后发生水 – 岩相互作用和相应的化学反应,逐渐溶解其中的部分 Sr,随着径流过程的延长逐渐富集,受不同地貌单元地质 – 水文地质条件的影响,溢出地表形成研究区矿泉水。



(a) $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+} - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ (b) $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+} - \text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$

图 12 研究区矿泉水物质端元图
Fig.12 Endmember diagram of mineral spring material in the study area

表 2 研究区岩石主要微量元素含量(数据来自文献[21])

Tab.2 Major trace elements content in rocks in the study area (datas according to reference [21])

岩石名称	元素含量/10 ⁻⁶													
	Sn	As	Sb	Bi	Hg	Te	P	Cr	Rb	Zr	Hf	Ba	Co	Cu
粉砂岩	4.2	9.51	0.73	0.46	0.01	0.033	596	83	117	187	4.9	446	17.1	37.1
细砂岩	2.1	5.62	0.06	0.06	<0.005	0.041	356	27.1	44.2	82.2	2.4	688	5.4	9.7
砂岩	2.2	57.17	0.71	0.21	0.021	0.045	476	476	84.3	150	4.8	172	511	13.3
灰岩	<0.5	0.85	0.19	0.04	<0.005	0.026	212	3.9	8.6	31.8	1.2	79.9	6.5	6.4
泰勒值(1964)	2	1.8	0.2	0.17	0.08	—	1 050	100	90	165	3	425	25	55

岩石名称	元素含量/10 ⁻⁶													
	Sr	V	Zn	Li	Be	Sc	Ga	Nb	Mo	Ta	W	Pb	Th	Ni
粉砂岩	602	88	106	48.8	2.34	12.6	18.9	16.4	0.21	1.31	1.57	8.42	13.3	35.8
细砂岩	1 751	28.1	19.3	18.8	0.73	5.97	4.41	4.42	0.1	0.33	0.32	9.15	7.55	12.5
砂岩	1 790	38.8	45.6	17.9	1.04	5.11	9.29	7.99	<0.1	0.69	0.69	8.25	1	22.3
灰岩	2 264	15.00	9.40	7.70	0.29	2.60	1.77	1.48	<0.1	0.10	0.14	1.07	3.23	13.5
泰勒值(1964)	375	135	70	20	2.8	22	15	20	1.5	2	1.5	12.5	9	75

4 结论

(1) 贵南地区地下水 Sr 含量为 0.42 ~ 2.46 mg/L, pH 值为 6.19 ~ 8.01, 均值为 7.45, TDS 值为 128.89 ~ 696.18 mg/L, 水化学类型为 HCO₃⁻ - Ca²⁺ 或 HCO₃⁻ - Ca²⁺ · Mg²⁺ 型, 整体属于弱碱性锶型矿泉水。

(2) 贵南地区矿泉水水化学组分受水 - 岩相互作用控制, 主要离子源于碳酸盐岩及硅酸盐岩的溶解, 该过程决定了区内矿泉水 Sr 来源; 南部中高山区充沛的降水为矿泉水的形成提供了充足的水源, 区域高度发育的基岩裂隙为矿泉水充分溶解围岩中的 Sr 提供了重要的运移通道, 基岩区岩石中 Sr 高含量的背景值为矿泉水中 Sr 的富集提供了充足的物质来源。

(3) 将贵南地区矿泉水按照地质 - 水文地质及出露条件分为基岩裂隙矿泉、第四系下降矿泉、第四系上升矿泉及构造上升矿泉共 4 种类型, 为附近村镇就近扩泉引水, 解决饮水问题及后续矿泉水资源可持续开发利用提供了定向靶区。

参考文献(References):

[1] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

Wang D C, Zhang R Q, Shi Y H, et al. Fundamentals of Hydrogeology[M]. Beijing: Geology Press, 1995.

[2] 李忠海, 韩丽伟, 赵彦涛, 等. 不同浓度锶对 MC3T3 - E1 细胞增殖、ALP 活性及成骨分化的影响[J]. 中国骨与关节杂志, 2016, 5(3): 221 - 225.

Li Z H, Han L W, Zhao Y T, et al. Effects of strontium on the pro-

liferation, ALP activity and the differentiation of MC3T3 cells[J]. Chinese Journal of Bone and Joint, 2016, 5(3): 221 - 225.

[3] 钟卫权, 黄叔怀. 锌对人体健康及运动能力的影响[J]. 中国临床康复, 2002(3): 410 - 411.

Zhong W Q, Huang S H. Effects of Zinc on human health and exercise capacity[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2002(3): 410 - 411.

[4] 孙厚云, 刘卫, 樊彦超, 等. 河北承德锶元素地球化学特征与富锶生态产业发展潜力[J/OL]. 中国地质, (2024 - 02 - 29) [2024 - 04 - 20].

Sun H Y, Liu W, Fan Y C, et al. Geochemical characteristics of strontium and development potential of strontium - rich ecological industry in Chengde, Hebei Province[J/OL]. Geology in China, (2024 - 02 - 29) [2024 - 04 - 20].

[5] 陶兰初, 邹祖建, 涂春霖, 等. 滇东富源地区岩溶地下水水化学特征及控制因素[J]. 地球与环境, 2024, 52(2): 253 - 265.

Tao L C, Zou Z J, Tu C L, et al. Hydrogeochemical characteristics and controlling factors of the karst groundwater in the area of Fuyuan, Eastern Yunnan[J]. Earth and Environment, 2024, 52(2): 253 - 265.

[6] 朱雪芹, 刘文波, 李志明, 等. 承德地区天然含锶矿泉水空间分布及特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 65 - 73.

Zhu X Q, Liu W B, Li Z M, et al. Distribution and characterization analyses of strontium - bearing mineral spring water in the Chengde region[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(6): 65 - 73.

[7] 陈远铭. 泰莱盆地含锶矿泉水的分布特征及成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.

Chen Y M. Distribution Characteristics and Genesis of Strontium - Containing Mineral Water in Tailai Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.

[8] 周鑫, 王璨, 郑鹏飞, 等. 湘南泥盆系碳酸盐岩区富锶饮用天然矿泉水成矿规律——以新田县新圩矿泉水为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 197 - 209.

Zhou X, Wang C, Zheng P F, et al. Metallogenic regularity of

- strontium-rich drinking natural mineral water in Devonian carbonate area in southern Hunan; Taking strontium-rich drinking mineral water in Xinxu town, Xintian county as an example [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 197-209.
- [9] 祁泽学, 汪生斌, 刘魁, 等. 昆仑山北坡黑刺沟大型天然矿泉水成因分析[J]. *盐湖研究*, 2024, 32(3): 21-31.
- Qi Z X, Wang S B, Liu K, et al. Origin of mineral water in Heicigou of northern slope of eastern Kunlun Mountains [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, 32(3): 21-31.
- [10] 祁泽学, 汪生斌, 李祥坤, 等. 柴达木盆地东缘天峻县阳陇沟天然饮用矿泉水成因分析[J/OL]. *宁夏大学学报: 自然科学版*, (2023-05-06) [2024-04-20].
- Qi Z X, Wang S B, Li X K, et al. Genetic analysis of natural drinking mineral water in Yanglonggou, Tianjun County, eastern margin of Qaidam Basin [J/OL]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, (2023-05-06) [2024-04-20].
- [11] 易晓明, 曹健. 湖南省饮用天然矿泉水及开发利用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2020.
- Yi X M, Cao J. *Drinking Natural Mineral Water and its Development and Utilization in Hunan Province* [M]. Changsha: Central South University Press, 2020.
- [12] 张彦林, 丁宏伟, 付东林, 等. 甘肃省锶矿水的富集环境及其形成机理研究[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1688-1701.
- Zhang Y L, Ding H W, Fu D L, et al. A study of enrichment environment and formation mechanism of strontium mineral water in Gansu Province [J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1688-1701.
- [13] 巴瑞寿, 赵振, 何胜, 等. 青海省贵南地区城区地下热水资源勘查报告[R]. 青海省环境地质勘查局, 2021.
- Ba R S, Zhao Z, He S, et al. *Exploration Report of Underground hot Water Resources in Guinan County, Qinghai Province* [R]. Environmental Geological Exploration Bureau of Qinghai Province, 2021.
- [14] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 8537—2018 食品安全国家标准饮用天然矿泉水[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 8537—2018 National Food Safety Standard for Drinking Natural Mineral Water [S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [15] 巴瑞寿, 吴萍, 哈伟, 等. 青海省贵南地区城区饮用天然矿泉水调查评价专题报告[R]. 青海省环境地质勘查局, 2019.
- Ba R S, Wu P, Ha W, et al. *A Special Report on the Investigation and Evaluation of Drinking Natural Mineral Water in the Urban Area of Guinan County, Qinghai Province* [R]. Environmental Geological Exploration Bureau of Qinghai Province, 2019.
- [16] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 8538—2022 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 8538—2022 National Food Safety Standard for Drinking Natural Mineral Water [S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [17] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0064. 1—2021 地下水质分析方法 第1部分: 一般要求[S]. 北京: 地质出版社, 2021.
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. DZ/T 0064. 1—2021 Groundwater Quality - Part 1: General Requirements [S]. Beijing: Geology Press, 2021.
- [18] 中华人民共和国自然资源部. DZ/T 0173—2022 大地电磁测深法技术规程[S]. 北京: 地质出版社, 2022.
- Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. DZ/T 0173—2022 Code of Practice for Magnetotelluric Sounding [S]. Beijing: Geology Press, 2022.
- [19] Liu J T, Gao Z J, Wang Z Y, et al. Hydrogeochemical processes and suitability assessment of groundwater in the Jiaodong Peninsula, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(6): 384.
- [20] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, 170(3962): 1088-1099.
- [21] 祁生胜, 马志康, 安守文, 等. 贵南地区幅、河南县幅 1:25 万区域地质调查报告[R]. 青海省地质调查院, 2008.
- Qi S S, Ma Z K, An S W, et al. *Guinan County Sheet, Henan County Sheet 1:250 000 Regional Geological Survey Report* [R]. Qinghai Provincial Geological Survey Institute, 2008.
- [22] 肖勇. 柴达木盆地南缘地下水循环演化模式及其变化趋势研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Xiao Y. *Groundwater Circulation patterns and Its change Trend in Southern Qaidam Basin, Northwest China* [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [23] 郭彤, 刘之葵, 陈成. 重庆市铜锣峡背斜地热水资源的形成与水力联系分析[J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38(1): 61-68.
- Guo T, Liu Z K, Chen C. Analysis on hydraulic connection and formation of geothermal water resources in Tongluo Mountain anticline, Chongqing [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2018, 38(1): 61-68.
- [24] 吴华武, 李小雁, 赵国琴, 等. 青海湖流域降水和河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 变化特征[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(9): 1552-1564.
- Wu H W, Li X Y, Zhao G Q, et al. The variation characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and river water, Qinghai Lake Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(9): 1552-1564.
- [25] 何胜, 马文鑫, 谢达娃当智, 等. 青海省贵南地区城区地下热水资源勘查物探报告[R]. 青海省环境地质勘查局, 2021.
- He S, Ma W X, Xie D W D Z, et al. *Geophysical Prospecting Report of Underground Hot Water Resources Exploration in Guinan County, Qinghai Province* [R]. Qinghai Bureau of Environmental Geology Exploration, 2021.
- [26] 杨艳林, 靖晶, 齐信, 等. 赣州北部丘陵山区浅层地下水化学特征及成因分析[J]. *中国地质调查*, 2023, 10(6): 60-68.
- Yang Y L, Jing J, Qi X, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism analysis of shallow groundwater in the northern hilly region of Ganzhou [J]. *Geological Survey of China*,

2023,10(6):60–68.

cust;anew table[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 8

[27] S. R. Taglor. Abundance of Chemical Elements in the Continental

(28):1273–1285.

Formation mechanism of natural mineral water in Guinan area of the southern Qinghai Lake

QI Zexue¹, ZHANG Jiting¹, HE Sheng¹, ZHANG Yongxing¹, ZHANG Guoqiang², ZHAO Shengjun²

(1. *Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining Qinghai 810012, China*;

2. *Environmental Geological Exploration Bureau of Qinghai Province, Xining Qinghai 810000, China*)

Abstract: Guinan area is located in the water conservation function area of Longyangxia section in the upper reaches of the Yellow River. The mineral water resources are very rich but with low degree of research. This area is basically in a natural state without exploitation or utilization, and the drinking water in some villages and towns is difficult to get. It is of great significance to study its occurrence, distribution and formation mechanism for the sustainable development and utilization of mineral water in this area and to solve the problem of drinking water in scattered villages and towns. The distribution characteristics of mineral water in the study area were systematically sorted out by statistical analysis, water chemical isotope and other graphic analysis methods. The accumulation mechanism of strontium – type natural mineral water was comprehensively discussed from the aspects of water chemistry, isotope and trace element background value of surrounding rocks. The results show that the strontium content in the groundwater in Guinan area ranges from 0.42 to 2.46 mg/L, with an average content of 0.92 mg/L, which belongs to the weakly alkaline strontium mineral water. Its hydrochemical composition is mainly controlled by water – rock interaction, and the background value of high strontium in regional rocks provides the material source for the formation of mineral water. The highly developed bedrock fissures provide a good migration space for the formation of mineral water. The research results could solve the difficulty of water use for some residents and provide a directional target area for the sustainable development and utilization of subsequent mineral water resources, and help the high – quality development of mineral water in Qinghai Province.

Keywords: the southern Qinghai Lake; Strontium type mineral water; formation mechanism; hydrogeological survey

(责任编辑: 王晗)