

文章编号:1004-4116(2022)02-0049-09

夏河清水沟锶型饮用天然矿泉水地球 化学特征及形成原因探讨

闫 旺¹,段 凯¹,焦世文²,李鹏举¹

(1. 甘肃省地矿局第三地勘院,甘肃 兰州 730050;2. 甘肃遥感地质中心,甘肃 兰州 730050)

摘 要:饮用天然矿泉水是含有一定矿物质和微量元素且未受污染的地下水,富含锶元素的矿泉水对维持人体生理功能具有重要意义。依据实际调查、水文地质勘探及围岩、水质化学成分测试等数据,在阐述区域水文地质条件的基础上,深入分析了矿泉水常规离子、25种离子界限指标及污染物、微生物、放射性指标化学特征和围岩锶含量分布特征,辅以矿泉水³H、¹⁴C等环境同位素分析,探讨了富锶地下水形成原因。结果表明,区内广泛分布的三叠系板岩、董青石角岩、闪长岩等围岩中形成的基岩裂隙水(含断裂带脉状裂隙水)及其循环转化形成的松散岩类孔隙水是矿泉水赋存的地下水类型,水化学类型为HCO₃-Ca型水,锶元素含量0.434~0.808 mg/L,TDS 60.9~395.4 mg/L,为低矿化富锶地下水;水年龄2 460~2 480 a,氡含量小于1.0 TU,属于大气降水入渗经深循环的远源补给;围岩是地下水中锶元素的主要母岩,地下水在径流循环过程中经过长时间的水岩互助作用,产生阳离子交换,使围岩中的锶元素被充分溶解和过滤进入含水层,从而形成富锶矿泉水。

关键词:锶型矿泉水;形成原因;地球化学背景;水质特征;甘肃夏河

中图分类号:P641.3

文献标志码:A

饮用天然矿泉水是含有一定矿物质和微量元素且未受污染的地下水,具有较高的社会利用价值^[1];锶(Sr)与人体健康密切相关,是人体生理功能所必需的微量元素之一,对维持人体生理功能具有重要意义^[2-3];长期以来,有关地下水中锶的富集环境及其形成机理一直受到水文地质界的关注,并进行了专门的研究和勘探^[4-9];一般认为,当地下水与富含锶的矿物质接触时,发生矿物分解化学作用,锶以离子的形式进入地下水系统;地下水停留在岩层中的时间越长,水中锶含量就越高^[10]。本文以新发现的甘肃省夏河县清水沟锶型饮用天然矿泉水为实例,通过分析区域水文地质条件、矿泉水及围岩的地球化学和环境同位素特征等手段,初步探讨了锶型矿泉水的形成原因。期望对我省天然饮用矿泉水的寻找及勘查开发有所启示,并与有关专家学者商榷。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

研究区位于青藏高原东北缘的夏河县曲奥乡清水沟,地貌类型为低起伏中高山区,海拔介于3 000~4 000 m之间;寒带湿润气候特征显著,年均降水量550~600 mm;发育的主要河流为清水沟,属黄河支流大夏河的一级支流,河流源于大气降水、季节性冰雪融水及基岩裂隙水(泉水)补给,流量动态变化过程与大气降水量的年内分配基本一致,6~9月份的径流量占全年的60%以上,枯水期为1~3月份及11~12月份;河谷呈NW—SE向展布,中上游呈“V”字型、下游呈“U”字型;土壤与植被类型具有明显垂直分带性,从山巅至河谷依次发育高山寒漠土、高山草甸土、黑钙土、栗钙土和人工垫淤土等,植被以草地、灌木丛及森林带为主,覆盖率达90%以

收稿日期:2022-02-21

基金项目:甘肃省地质勘查基金项目“甘肃省夏河县清水沟饮用天然矿泉水资源勘查”(201502-D15)资助;甘肃省矿产资源补偿费项目“甘肃省临夏州太子山—甘南州甘加一带1:5万矿产远景调查”资助

作者简介:闫旺(1990~),男,甘肃白银,水工环工程师,主要从事水工环地质调查和矿产勘查工作,E-mail:yanwang520000@163.com

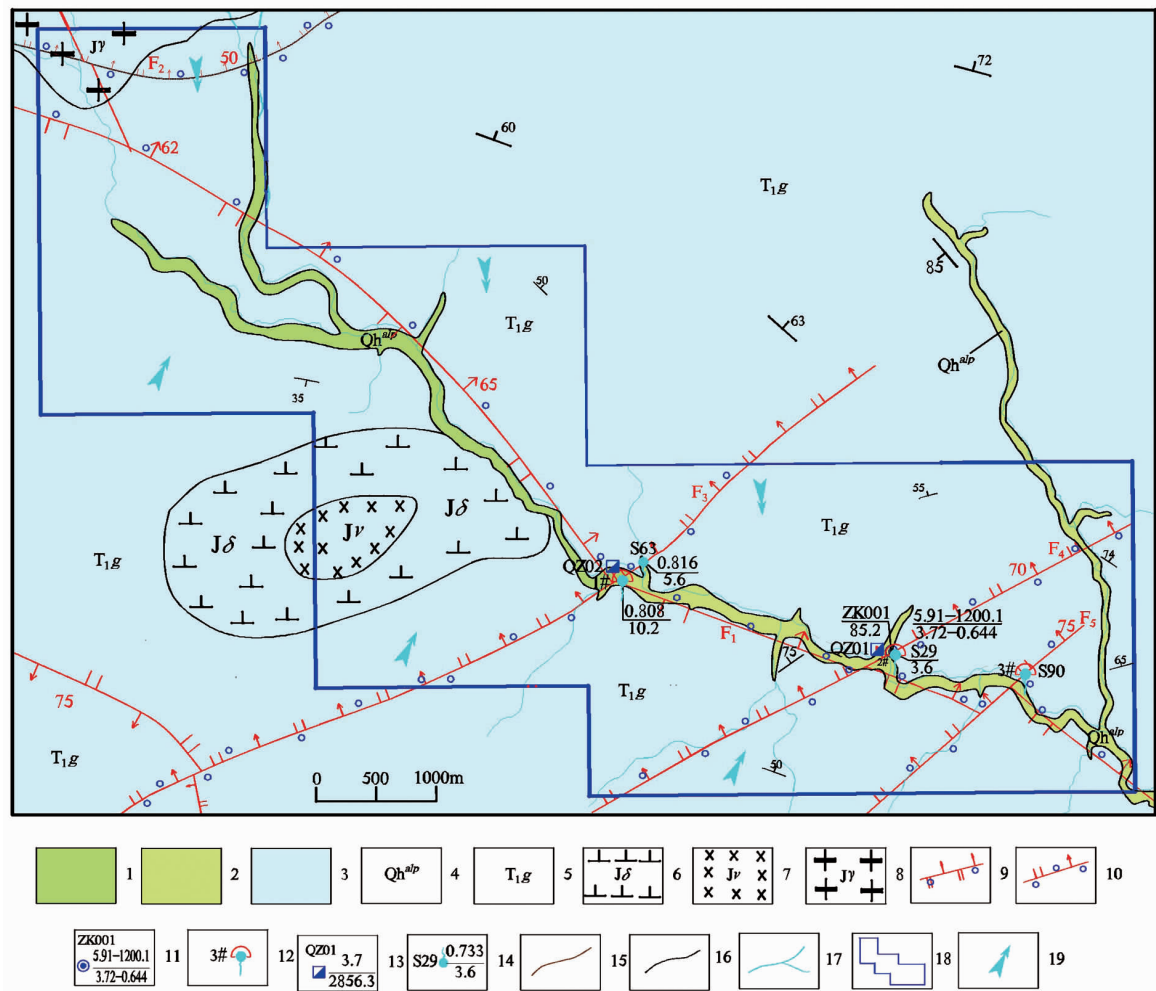


图 1 研究区水文地质略图

Fig. 1 Hydrogeological sketch of the study area

- 1—第四系松散岩类孔隙水(单井涌水量100 ~ 500 m³/d);2—第四系松散岩类孔隙水(单井涌水量10 ~ 100 m³/d);
3—基岩裂隙水(单泉流量0.9 ~ 10.2 L/s,地下水径流模数4.515 L/s·km²);4—第四系冲洪积砂砾石;5—三叠纪果木沟组;6—闪长岩;
7—辉长岩;8—斑状花岗岩;9—一侧充水断层(单井涌水量100 ~ 500 m³/d);10—两侧充水断层(单井涌水量100 ~ 500 m³/d);
11—本次施工勘探孔 钻孔编号·降深(m)-涌水量(m³/d);12—观测泉;13—试坑 编号·水位埋深(m);14—泉水 编号·流量(L/s);
15—水文地质界线;16—富水性界线;17—地表径流;18—研究区范围;19—地下水流向

上。特别是沿山坡及河谷分布的优质天然草原,盛产素有“高原之舟”称谓的牦牛以及甘加羊、蕨麻猪等优良牲畜,是甘肃省重点畜牧区之一。

1.2 地质背景

研究区沟谷内出露地层为第四系全新统冲洪积砂砾卵石(Qh^{alp}),厚度一般小于15 m;大面上出露地层为三叠系果木沟组(T_{1g}),岩性为灰色、灰黑色及灰绿色砂岩、板岩夹不稳定含砾砂岩、粗砂岩及含砾灰岩。其中灰岩层位集中,单层厚度一般较大,岩层层理发育;板岩层理厚度一般介于3 ~ 10 cm之间,以水平及波状层理为主,兼有斜层理及波状过渡

层理;西部及西北端小面积出露印支期—燕山期闪长岩(Jδ)、辉长岩(Jν)及斑状花岗岩(Jγ)。辉长岩为橄榄辉长岩、细粒辉长岩,呈捕虏体或者残留体产于闪长岩体中;斑状花岗岩体,呈岩株状产出。区内地质构造发育,主断裂为NW向压扭性逆冲断层,属阻水断层(F₁),地下水赋存于靠近断层上盘部位的三叠系砂质、板岩中;NE向次级张性断裂(F₂、F₃、F₄、F₅)横切清水沟呈近似平行状展布,断层性质以导水的正断层为主(图1)。

1.3 水文地质条件

区内地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙

水、三叠系层状岩类基岩裂隙水及断裂带脉状裂隙水。基岩裂隙水、断裂带脉状裂隙水具有承压性质,沿 F_3 、 F_4 、 F_5 断裂走向出露多处上升泉(S 63、S 29、S 90)(图1)。根据本项目施工的 ZK01 孔(孔深 85.2 m,位于 F_4 断层北侧)水文地质勘探资料,水位埋深 3.72 m,稳定降深 5.91 m 时,稳定涌水量 1 200.10 m^3/d 。

松散岩类孔隙水、基岩裂隙水(含断裂带脉状裂隙水)的补给、径流、排泄条件,受区域构造及相应的地貌岩相带制约(图 2)。松散岩类孔隙水接受大气降水、季节性冰雪融水及地表径流的垂向入渗补给,同时接受山地基岩裂隙水的侧向补给,受季节影响较大;地下水顺沟或沿沟谷两侧向沟床流动,最终以泉或地表水溢出排泄。基岩裂隙水(断裂带脉状裂隙水)主要接受丰沛大气降水和季节性冰雪融水的垂向入渗补给,次为区外基岩裂隙水的侧向补给,地下水沿节理、裂隙、层理及断层由山巅向沟谷运移,部分储存于断裂破碎带形成断裂带脉状裂隙水,大部分以断层上升泉和侧向径流的方式排泄于河谷,成为清水沟松散岩类孔隙水和地表径流的重要组成部分。由此可以看出,研究区基岩裂隙水(含断裂带脉状裂隙水)与松散岩类孔隙水之间的水利联系较为密切,形成相互补给与排泄的含水系统。

2 水样采集与测试

2.1 样品采集

水样采集按照中国地质调查局发布的《水样采集与送检技术要求》进行;采集分析矿泉水全分析样品 62 件,饮用水水质综合分析样 26 件,微生物分析样 26 件, ^{14}C 同位素测年样品 2 件, 3H 同位素测年样 1 件。

2.2 样品测试

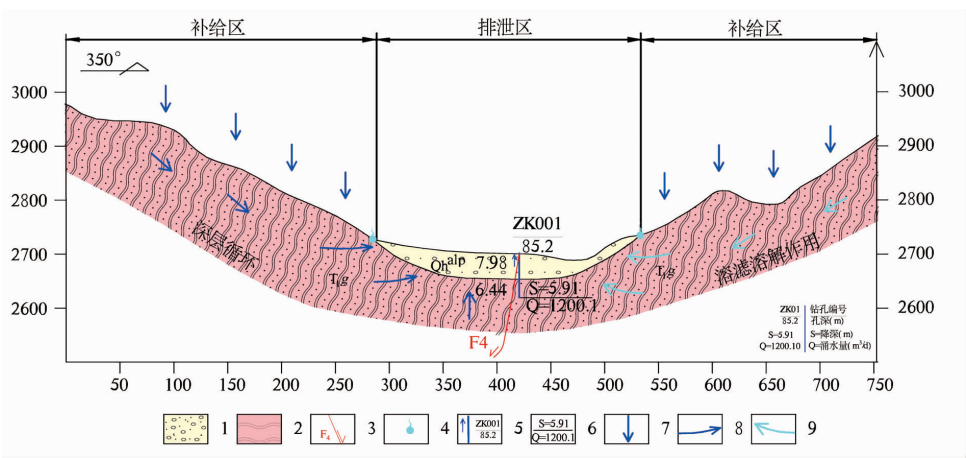


图 2 清水沟地下水补给、径流、排泄特征示意剖面图
Fig. 2 Schematic profile illustrating groundwater recharge, runoff and discharge characteristics of Qingshuigou gully

1—第四系冲洪积砂砾石;2—三叠纪果木沟组板岩、董青石角岩;3—逆断层及编号;4—观测泉;
5—本次施工勘探孔 钻孔编号 孔深(m) S-降深(m) Q-涌水量(m³/d);6—
8—经深层循环、溶解溶滤径流;9—以泉群排泄

样品分析项目包括感官要求、理化要求(边界指标、限值指标、污染物指标、微生物指标等)。水样主检测单位为国土资源部地下水矿泉水及环境检测中心;平行样送检单位分别由国家城市供水水质监测兰州监测站、国土资源部兰州矿产资源监督检测中心、甘肃国信润达分析测试中心完成;微生物指标由甘肃省食品检验研究院及甘肃国信润达分析测试中心完成;水样环境同位素送检单位为国土资源部地下水矿泉水及环境检测中心。样品测试方法按照《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T 8538-2008) 进行。其中锂、锶和锌采用火焰原子吸收分光光度法测试;硒采用氢化物生成原子吸收分光光度法测试;偏硅酸采用硅钼黄分光光度法测试。锶的检出限为 0.10 mg/L,锂的检出限为 0.005 mg/L,锌的检出限为 0.002 mg/L,硒的检出限为 0.001 mg/L,偏硅酸的检出限为 2.60 mg/L^[11-12]。

3 矿泉水地球化学分析结果

3.1 水化学特征和类型

通过对研究区为期一个水文年的地下水采样测试(表 1),水中的 K^+ 含量为 1.46 ~ 0.92 mg/L, Na^+ 含量为 8.96 ~ 4.93 mg/L, Ca^{2+} 含量为 61.36 ~ 48.28 mg/L, Mg^{2+} 含量为 24.28 ~ 6.02 mg/L, HCO_3^- 含量为 237.2 ~ 161.4 mg/L, Cl^- 含量为 5.24 ~ 2.07 mg/L, SO_4^{2-} 含量为 52.38 ~ 21.64 mg/L,溶解

表 1 综合异常评序表

Table 1 Statistics of water chemistry parameters in the study area

编号	Sr	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	可溶性总固体	pH	总硬度	NO ₃ ⁻
1	0. 736	57. 91	24. 28	5. 98	0. 92	237. 2	52. 38	4. 89	395. 4	7. 58	244. 7	4. 62
2	0. 666	55. 54	10. 76	7. 76	1. 26	201. 2	23. 97	5. 24	319. 1	7. 70	183. 2	6. 08
3	0. 619	48. 28	11. 88	7. 80	1. 38	183. 4	22. 53	5. 24	294. 0	7. 72	169. 6	6. 53
4	0. 434	49. 88	5. 71	4. 93	1. 06	161. 4	19. 93	5. 24	260. 9	7. 74	148. 1	5. 89
5	0. 728	55. 81	22. 24	6. 41	1. 04	223. 3	51. 71	2. 07	373. 6	7. 71	231. 2	4. 24
6	0. 693	54. 62	11. 17	8. 63	1. 25	195. 3	28. 27	4. 82	318. 9	7. 65	182. 2	7. 64
7	0. 672	50. 45	12. 41	8. 31	1. 40	183. 1	25. 92	3. 10	298. 1	7. 74	177. 1	6. 04
8	0. 486	52. 20	6. 08	5. 54	1. 06	164. 8	22. 66	2. 75	267. 7	7. 73	155. 6	5. 24
9	0. 868	61. 36	23. 71	6. 42	1. 03	234. 7	49. 53	4. 84	392. 8	7. 53	250. 7	4. 36
10	0. 733	59. 04	11. 67	8. 96	1. 34	204. 6	29. 22	4. 84	332. 5	7. 55	195. 7	5. 68
11	0. 694	50. 11	12. 5	8. 42	1. 46	192. 6	24. 72	5. 19	307. 8	7. 56	176. 6	6. 28
12	0. 465	52. 46	6. 02	5. 56	1. 11	164. 3	21. 64	5. 19	267. 8	7. 6	155. 6	4. 72
13	0. 644	59. 00	10. 37	8. 55	1. 28	193. 3	28. 48	5. 24	320. 4	7. 73	190. 2	7. 29

注:含量单位为 mg/L

表 2 清水沟饮用天然矿泉水界限指标

Table 2 The limit index of natural mineral water for drinking and water quality in Qingshuigou

项目	要求	检测结果				评价
		S29 丰水期	S29 平水期	S29 枯水期	ZK001	
		(2016. 8. 12)	(2016. 4. 30)	(2016. 1. 15)	(2017. 12. 3)	
锂	≥ 0. 2	0. 007	0. 008	0. 008	< 0. 005	/
锶	≥ 0. 20(含量在 0. 2 mg/L~0. 4 mg/L 时,水温应在 25℃以上)	0. 666	0. 693	0. 734	0. 644	达标
锌	≥ 0. 2	< 0. 002	< 0. 002	0. 002	< 0. 002	/
碘化物	≥ 0. 2	< 0. 02	< 0. 02	< 0. 02	< 0. 02	/
偏硅酸	≥ 25. 0(含量在 25. 0 mg/L~30. 0 mg/L 时,水温应该 25℃以上)	9. 3	9. 28	9. 26	8. 64	/
游离二氧化碳	≥ 250	8. 6	6. 85	5. 2	6. 53	/
溶解性总固体	≥ 1 000	319. 1	318. 9	332. 5	320. 4	/
硒	< 0. 05	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	合格
锑	< 0. 005	< 0. 000 5	< 0. 000 5	< 0. 000 5	< 0. 000 5	合格
砷	< 0. 01	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	合格
铜	< 1. 0	< 0. 01	< 0. 01	< 0. 01	< 0. 01	合格
钡	< 0. 7	0. 025	0. 024	0. 027	0. 023	合格
镉	< 0. 003	< 0. 002	< 0. 002	< 0. 002	< 0. 000 5	合格
铬	< 0. 05	< 0. 02	< 0. 02	< 0. 02	< 0. 02	合格
铅	< 0. 01	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	合格
汞	< 0. 001	< 0. 000 1	< 0. 000 1	< 0. 000 1	< 0. 000 1	合格
锰	< 0. 4	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	合格
镍	< 0. 02	< 0. 008	< 0. 008	< 0. 008	< 0. 008	合格
银	< 0. 05	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 001	合格
溴酸盐	< 0. 1	< 0. 01	< 0. 01	< 0. 01	< 0. 01	合格
硼酸盐(以 B 计)	< 5	< 0. 10	< 0. 10	< 0. 10	< 0. 10	合格
硝酸盐(以 NO ₃ ⁻ 计)	< 45	6. 08	7. 64	5. 68	7. 29	合格
氟化物(以 F ⁻ 计)	< 1. 5	0. 19	0. 14	< 0. 10	0. 21	合格
耗氧量(以 O ₂ 计)	< 3. 0	1. 24	1. 31	0. 6	0. 78	合格
镭放射性,Bq/L	< 1. 1	0. 01	0. 01	0. 01	0. 01	合格

注:含量单位为 mg/L

性总固体(TDS,矿化度)含量为 395. 4 ~ 260. 9 mg/L, pH 值介于 7. 74 ~ 7. 53 之间,总硬度(以 CaCO₃计)为 250. 7 ~ 148. 1 mg/L, 偏硅酸含量为 9. 3 ~ 8. 64 mg/L,NO₃⁻含量为 7. 64 ~ 4. 24 mg/L。按舒卡列夫分类法划分, 研究区矿泉水化学类型分为 HCO₃-Ca 型水,属低矿化微硬水。

3.2 水质界限指标

水样测试结果表明,水中锶含量在丰水期、平水期、枯水期及钻孔内实测值介于 0. 434 ~ 0. 808 mg/L 之间,已达到饮用天然矿泉水的界限指标。其中锂、锌、碘化物、偏硅酸、游离二氧化碳、溶解性

总固体含量低于界限指标的要求;其余硒、锑、砷、铜、钡、镉、铬、铅、汞、锰、镍、银、溴酸盐、硼酸盐(以 B 计)、硝酸盐(以 NO₃⁻计)、氟化物(以 F 计)、耗氧量(以 O₂ 计)、(²²⁶Ra)镭放射性等 18 种离子含量均满足《饮用天然矿泉水标准(GB 8537-2018)》(表 2)。

3.3 污染物和微生物指标

通过研究区内 S29 水点、ZK001 钻孔一个完整水文年的水样采集测试, 水中挥发性酚(以苯酚计)、氰化物(以 CN⁻计)、阴离子合成洗涤剂、矿物油、亚硝酸盐(以 NO₂⁻计)、总 β 放射性的含量均小

表 3 清水沟饮用天然矿泉水污染物指标
Table 3 Pollutant indicators of natural mineral water for drinking and water quality in Qingshuigou

项目	要求	检测结果				评价
		S29 丰水期 (2016. 8. 12)	S29 平水期 (2016. 4. 30)	S29 枯水期 (2016. 1. 15)	ZK001 (2017. 12. 3)	
挥发性酚(以苯酚计)	< 0. 002	< 0. 002	< 0. 0015	< 0. 0015	< 0. 002	合格
氰化物(以 CN ⁻ 计)	< 0. 010	< 0. 002	< 0. 001	< 0. 001	< 0. 002	合格
阴离子合成洗涤剂	< 0. 3	< 0. 025	< 0. 10	< 0. 10	< 0. 025	合格
矿物油	< 0. 05	< 0. 005	< 0. 005	< 0. 005	< 0. 005	合格
亚硝酸盐(以 NO ₂ ⁻ 计)	< 0. 1	< 0. 002	< 0. 002	< 0. 002	< 0. 002	合格
总 β 放射性,Bq/L	< 1. 50	0. 07	0. 07	0. 07	0. 06	合格

注:含量单位为 mg/L

表 4 2#观测泉、钻孔ZK001(29号泉点)微生物样品检测结果
Table 4 Water quality detection of water samples from 2# observation spring and borehole ZK001 (No. 29 spring point)

分析项目	SPW2016-0932 (2016. 4. 11)	SPW2016-1696 (2016. 6. 27)	GGFCZXW-2016-2050 (2016. 8. 12)	按照不同时间段采取样品 14 件 (2017. 12. 1)	GB8537-2008 要求
大肠杆菌(MPN/100 mL)	< 1	0	0	0	0
粪链球菌(CFU/250 mL)	0	0	32	0	0
产气荚膜梭菌(CFU/250 mL)	0	0	0	0	0
铜绿假单胞菌(CFU/250 mL)	0	0	0	0	0

于污染物限量标准(表 3)。水中大肠杆菌、粪链球菌(包括产气荚膜梭菌、铜绿假单胞菌)等微生物限量指标均未超标(表 4)。说明研究区矿泉水未受到污染。

4 围岩的锶含量和矿泉水环境同位素特征

4.1 矿泉水围岩锶含量

通过对研究区出露地层 11 个样品锶元素的定量分析(表 5),花岗岩(含斑状花岗岩、细粒花岗岩)锶含量为 $102 \times 10^{-6} \sim 18. 6 \times 10^{-6}$,闪长岩锶含量为

表 5 地层锶元素分析结果表
Table 5 Strontium of rock samples the study area

送样号	岩性	$w(\text{Sr})/10^{-6}$
2016 KQS-GP 01	斑状花岗岩	18. 6
2016 KQS-GP 02	细粒花岗岩	102
2016 KQS-GP 03	闪长岩	514
2016 KQS-GP 04	板岩	299
D 147-GP 01	花岗岩	45. 3
D 103-GP 01	花岗岩	84. 3
D 4-GP 01	堇青石角岩	405
D 161-GP 01	粉砂质板岩	589
D 29-GP 01	粉砂质板岩	240
D 90-GP 01	粉砂质板岩	212
D 150-GP 01	粉砂质板岩	381

514×10^{-6} ,粉砂质板岩(含板岩)锶含量为 $589 \times 10^{-6} \sim 212 \times 10^{-6}$,堇青石角岩锶含量为 405×10^{-6} 。由此可以看出,研究区板岩、堇青石角岩、闪长岩锶含量相对比较富集,是矿泉水中锶元素的主要母岩。地下水在径流循环过程中经过长时间的水岩互助作用,导致周围板岩、堇青石角岩、闪长岩中的一些矿物成分或元素被充分溶解和过滤,并达到水岩之间的化学动力学平衡状态,形成锶型矿泉水。

4.2 矿泉水环境同位素特征

水体中氢氧稳定同位素常用于追踪水的来龙去脉,分析地下水的补给源和循环转化特征,从而揭示地下水的形成环境。水中氦含量越小说明地下水年龄越老,径流途径越远,循环深度越深;水中氦含量越大说明地下水年龄较新,径流途径越短,循环深度越浅。一般而言,水中氦含量 $> 5.0 \sim 8.0$ TU,表明地下水是核爆以后(1944 年以后)形成的,而水中氦含量 < 5.0 TU,表明地下水是核爆以前形成的。研究区矿泉水中氦含量 < 1.0 TU(表 6),说明清水沟矿泉水是核爆以前形成的,且属于深循

环的远源补给;利用矿泉水中 ^{14}C 测试结果可以看出,清水沟矿泉水年龄为 $2\,460 \sim 2\,480$ a,与氦含量测试结果一致。

5 富锶地下水形成原因探讨

5.1 溶滤溶解作用及阳离子交换强度

通过对单一岩性地下水系统中硅酸盐岩、蒸发盐岩和碳酸盐岩的水化学特性的比较分析,岩石中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ 之间的关系可以确定不同岩石风化溶滤对水体溶质的影响^[14]。研究区采样点主要集中于硅酸盐和碳酸盐岩之间(图 3),均达到碳酸盐岩控制界线,表明矿泉水主化学组分主要来源于硅酸岩盐和碳酸盐岩的风化溶解。这与清水沟地下水主要接受上游硅酸盐岩风化溶滤作用侧向补给与地表水径流补给,以及地下水在长期的水岩互助过程中对板岩、堇青石角岩、闪长岩含锶元素的溶滤溶解和吸收的地质背景较为一致。

进一步研究发现,水中 $\gamma[(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\text{Cl}^{-}]$ 毫克当量比值关系可以反映 Na^{+} 和 K^{+} 的来源(图 4 a),比值小于 1.0,表明 Na^{+} 和 K^{+} 来源除硅酸盐岩溶解外,降雨入渗补给和碳酸盐岩溶解亦为重要来源;同理,水中 $\gamma[(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})/\text{HCO}_3^{-}]$ 毫克当量比值的散点图可以反映水体中溶解的碳酸岩盐、硅酸盐岩的来源,研究区水化学样本分布于 1:1 直线下部,且离直线较远(图 4 b),表明水中 SO_4^{2-} 与 Cl^{-} 来源既有

表 6 同位素测年结果
Table 6 Isotope dating results

送样号	取样位置	分析项目	分析结果
KQS-150	S29 泉	T(TU)	< 1.0
2017KQS-14C-01	ZK001	^{14}C	$\sim 2\,480$ BP
2017KQS-14C-02		^{14}C	$\sim 2\,460$ BP

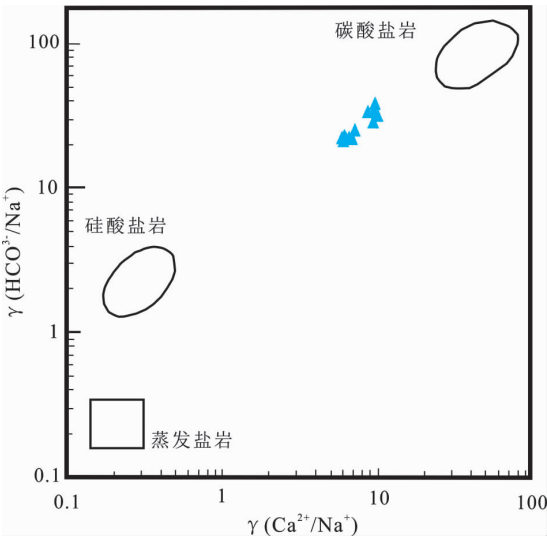
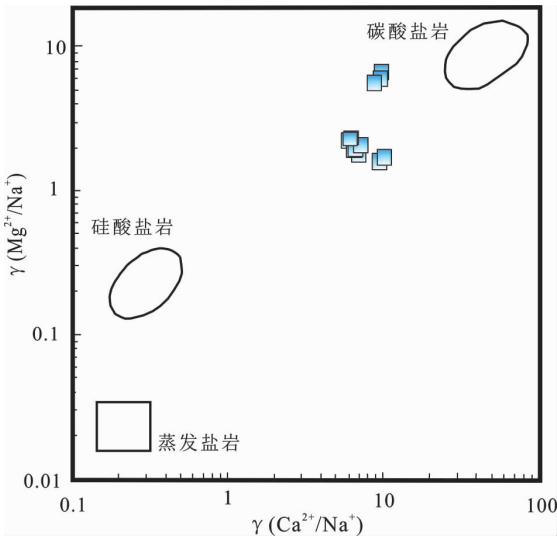


图 3 研究区水化学 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ (a)、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ (b)关系图
Fig. 3 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+} - \text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ diagram (a), $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+} - \text{HCO}_3^{-}/\text{Na}^{+}$ diagram (b)

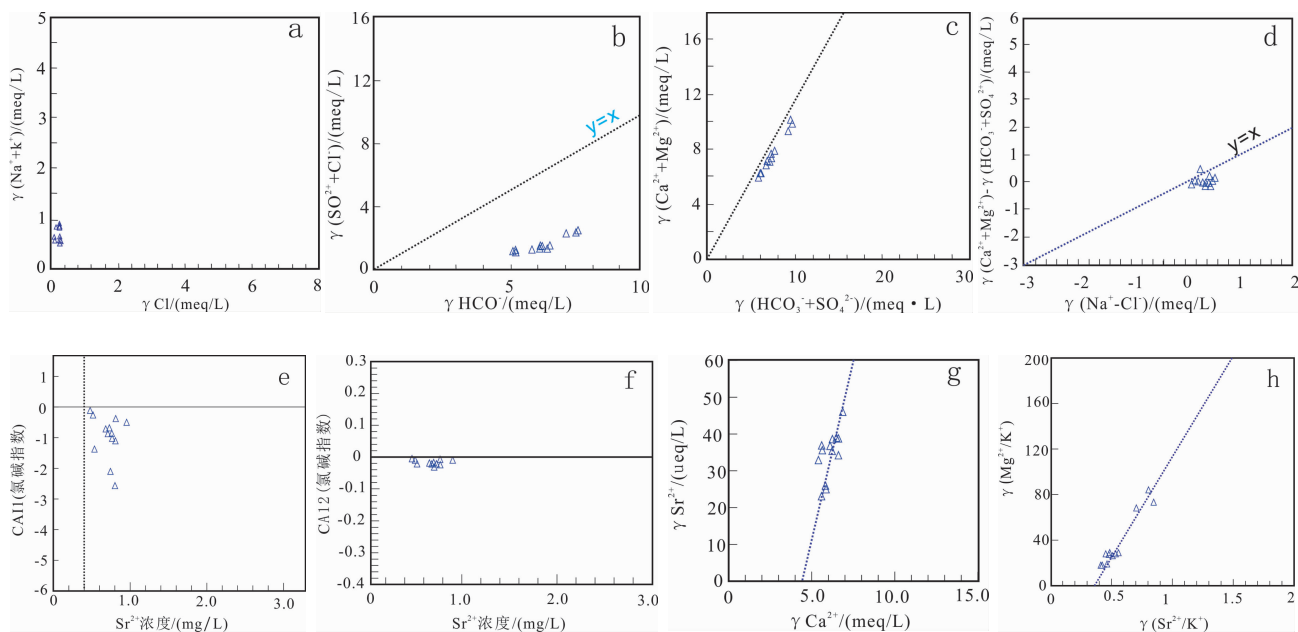


图4 地下水离子比值相关图

Fig. 4 Correlation diagram of groundwater ion ratio

硅酸盐岩的溶解,亦有碳酸盐岩的溶解,但主体受硅酸盐矿物溶解控制。水中 $\gamma[(Ca^{2+} + Mg^{2+})/(HCO_3^- + SO_4^{2-})]$ 毫克当量比值可以判断 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源^[15],研究区地下水离子比值位于 1:1 直线下部附近(图 4 c),说明碳酸盐岩对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 贡献率较小,水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自板岩、堇青石角岩、闪长岩溶滤溶解。水中 $\gamma[(Na^+ - Cl^-)/(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^-)]$ 毫克当量比值关系可以反映阳离子交换强度,研究区地下水离子比值集中分布于 1:1 直线附近,大致呈线性相关(图 4 d),表明水中 Na^+ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 交换作用随着地下水径流途径增长而不断增强。

5.2 富锶地下水的形成原因

锶是一种二价碱金属离子,离子半径与钙离子相似。在水与岩石矿物溶解—沉淀反应过程中, Sr^{2+} 会逐渐取代岩石矿物中 Ca^{2+} 发生阳离子交换作用。当水岩反应平衡时,水体中 Sr^{2+} 含量一般趋于增加,而 Ca^{2+} 含量趋于减少^[16]。此外,在岩浆结晶分异过程中,早期的岩浆还富集了更多的锶, Sr^{2+} 还可以取代含钾铝硅酸盐(如钙长石、钾长石等)中的 K^+ ,使一定量的 Sr^{2+} 释放到水体中^[17]。

本文利用水中氯碱指数(CAI1/CAI2)来识别判断地下水 Sr^{2+} 含量与阳离子交换吸附强度的关系^[16]。

计算方法:

$$CAI1 = [Cl^- - (Na^+ + K^+)] / Cl^-$$

$$CAI2 = [Cl^- - (Na^+ + K^+)] / (HCO_3^- + SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + NO_3^-)$$

氯碱指数大于 0,说明水中的 Na^+ 和 K^+ 与围岩中的 Sr^{2+} 发生离子交换;反之,氯碱指数小于 0,则是水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与围岩中的 Sr^{2+} 发生离子交换。当 CAI1 和 CAI2 绝对值较大时,阳离子交换发生的可能性越大。

由图 4 e、图 4 f 可以看出,研究区地下水 CAI1 值介于 -3 ~ 0 之间,CAI2 值介于 -0.04 ~ 0 之间,氯碱指数均小于 0,且 CAI1 绝对值较大,说明地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与围岩中的 Sr^{2+} 发生了强烈的离子交换作用,地下水中 Sr^{2+} 来源主要为水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与围岩中 Na^+ 、 K^+ 发生交换作用时从围岩中释出。

进一步研究表明,地下水中 $\gamma(Sr^{2+}/Ca^{2+})$ 和 $\gamma(Sr^{2+}/Mg^{2+})$ 比值呈正线性相关(图 4 g、图 4 h),且比值相对较大,说明水中 Sr^{2+} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 有相似来源,也就是水岩互助作用越强烈,地下水 Sr^{2+} 越相对富集。

6 结论

(1)研究区地下水类型为沿清水沟分布的松散岩类孔隙水、面状分布的基岩裂隙水和沿导水断

层分布的断裂带脉状裂隙水,基岩裂隙水(含断裂带脉状裂隙水)及其循环转化的松散岩类孔隙水是矿泉水赋存的地下水类型。大气降水形成的基岩裂隙水沿裂隙、节理及断裂带由山巅向沟谷运移,大部分以断层上升泉和侧向径流的方式排泄于沟谷,构成地下水与地表水联系密切的水资源系统。

(2)水文地质勘探及一个水文年的水质动态测试结果表明,清水沟地下水富水性较好,单井涌水量约 $1\,200\text{ m}^3/\text{d}$;水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水,锶含量 $0.434 \sim 0.808\text{ mg/L}$,可溶性总固体 $260.9 \sim 395.4\text{ mg/L}$,水的物理性质与感官特性指标、常量元素指标、理化指标及放射性指标均符合《饮用天然矿泉水标准(GB 8537-2018)》的品质要求,属低矿化锶型饮用天然矿泉水;泉水年龄为 $2\,460 \sim 2\,480\text{ a}$,氡含量小于 1.0 TU ,属于深循环的远源补给。

(3)区内大面积分布的板岩、堇青石角岩、闪长岩等围岩锶含量相对比较富集,是矿泉水中锶元素的主要母岩。地下水在径流循环过程中经过长时间的水岩互助作用,产生阳离子交换,使围岩中的锶元素被充分溶解和过滤进入含水层,从而形成锶型矿泉水。

参 考 文 献

- [1] 郭文祥. 韩城龙饮天然饮用矿泉水成因分析 [J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(01): 44-46
- [2] 陶湧, 王华敏, 付彦芬. 天然矿泉水对人体健康影响的研究 [J]. 环境与健康杂志, 1992, 009(003): 101-103

- [3] 季坚, 曹毅, 薛德彬. 饮用天然矿泉水对高血压病人血压的影响和分析 [J]. 微量元素与健康研究, 2001(02): 23-24
- [4] 苏春田, 罗飞, 杨杨, 等. 湖南新田富锶矿泉水形成机理浅析 [J]. 中国矿业, 2019, 28(S1): 347-348
- [5] 张彦林, 丁宏伟, 付东林, 等. 甘肃省锶矿泉水的富集环境及其形成机理研究 [J]. 中国地质, 2020, 47(06): 1688-1701
- [6] 李辉, 翟星, 刘硕, 等. 冀东都山地区富锶矿泉水锶的运移与赋存特征分析 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(02): 458-464
- [7] 姜海宁, 谷洪彪, 于一雷, 等. 瓶装饮用水的水化学、同位素特征及其指示意义 [J]. 地球与环境, 2015, 43(04): 403-414
- [8] 沈照理, 许绍倬. 中国饮用天然矿泉水 [M]. 北京, 中国地质大学出版社, 1989
- [9] 车用太. 饮用天然矿泉水 [M]. 北京, 地震出版社, 1995
- [10] 王松, 王菁华, 潘虹, 等. 高锶矿泉水研究 [J]. 黑龙江科学, 2019, 10(08): 32-33
- [11] 张利民, 杨丽君, 张吉才, 等. ICP-AES 测定饮用天然矿泉水中 10 种微量元素 [J]. 光谱实验室, 2005(01): 142-144
- [12] 张岚. 饮用天然矿泉水标准检验方法 [J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(10): 910-911
- [13] 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 等. 滦河流域中上游富锶地下水成因类型与形成机制 [J]. 地球学报, 2020, 41(01): 65-79
- [14] Négrel P, Pauwels H, Chabaux F. Characterizing multiple water-rock interactions in the critical zone through Sr-isotope tracing of surface and groundwater [J]. Applied Geochemistry, 2018, 93: 102-112
- [15] Katz B G, Bullen T D. The combined use of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and carbon and water isotopes to study the hydrochemical interaction between groundwater and lakewater in mantled karst [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(24): 5075-5087
- [16] Hanshaw B B, Back W. Major geochemical processes in the evolution of carbonate-Aquifer systems [J]. Journal of Hydrology, 1979, 43(1): 287-312
- [17] 王强, 许继锋, 赵振华. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(002): 201-208

HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF STRONTIUM-RICH GROUNDWATER IN QINGSHUIGOU OF XIAHE COUNTY, GANSU PROVINCE

YAN Wang¹, DUAN Kai¹, JIAO Shi-wen², LI Peng-ju¹

(1. *The Third Institute of Geology and Mineral Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730050, China;*

2. *Gansu Remote Sensing Geology Center, Lanzhou 730050, China*)

Abstract: Natural mineral water for drinking is groundwater containing certain minerals and trace elements and uncontaminated, and mineral water rich in strontium is important for maintaining human physiological functions. Based on the data of actual investigation, hydrogeological exploration and tests of surrounding rocks and chemical composition of water quality, the chemical characteristics of conventional ions, 25 ion limit indicators and contaminants, microorganisms and radioactive indicators of mineral water and the distribution characteristics of strontium content of surrounding rocks were analyzed in depth on the basis of the elaboration of regional hydrogeological conditions, and the causes of strontium-rich groundwater formation were explored with the supplemental analysis of environmental isotopes such as ³H and ¹⁴C of mineral water. The results show that the bedrock fracture water (including fracture zone vein fracture water) formed in the widely distributed Triassic slate, cordierite angular rocks, amphibolite and other surrounding rocks in the area and the loose rock pore water formed by its cyclic transformation are the types of groundwater endowed with mineral water, and the water chemistry type is HCO₃-Ca type water, with strontium element content of 0.434 ~ 0.808 mg/L, TDS 260.9 ~ 395.4 mg/L, is low mineralization strontium-rich groundwater; water age 2460 ~ 2480 a, tritium content is less than 1.0 TU, belongs to atmospheric precipitation infiltration through deep circulation of remote source recharge; surrounding rock is the main parent rock of strontium element in groundwater, groundwater in the process of runoff circulation after a long time of water-rock mutual assistance, resulting in cation exchange, so that strontium element in surrounding rock is fully dissolved and filtered into the aquifer, thus Strontium-rich mineral water is formed.

Key words: strontium type mineral water; water quality characteristics; geochemical background; genesis of groundwater; Xiahe County