doi: 10.12029/gc20200607

张彦林,丁宏伟,付东林,黄增保,李爱军,闫成云,金霞. 2020. 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, 47(6): 1688−1701.

Zhang Yanlin, Ding Hongwei, Fu Donglin, Huang Zengbao, Li Aijun, Yan Chengyun, Jin Xia. 2020. A study of enrichment environment and formation mechanism of strontium mineral water in Gansu Province[J]. Geology in China, 47(6):1688−1701(in Chinese with English abstract).

甘肃省锶矿泉水的富集环境及其形成机理研究

张彦林[1],丁宏伟[2,3],付东林[4],黄增保[1],李爱军[1],闫成云[1],金霞[1]

(1. 甘肃省地质调查院,甘肃 兰州 730000;2. 甘肃省地质矿产勘查开发局,甘肃 兰州 730000;3. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室,甘肃 兰州 730000;4. 甘肃省地质环境监测院,甘肃 兰州 730000)

提要:甘肃省位于中国四大地理区(北方区、南方区、西北区和青藏高原区)的相接部位,气候类型多样、地质构造活动强烈、地形复杂、地貌形态多样,复杂的地质条件、多样的地理气候环境和水文地质条件,为锶矿泉水的形成提供了有利条件。通过对全省644个水点的样品检测分析,表明锶含量主要集中在0.09~1.00 mg/L,最高值达15.6 mg/L,锶含量≥0.40 mg/L、达到饮用天然矿泉水界限含量的水点共有411个,占全部水点的58.1%,锶是甘肃省地下水中普遍含有并且含量较丰的微量元素之一。经统计分析表明,在水文地质单元上,以山前盆地第四系地下水为主的河西走廊平原区和以白垩系碎屑岩孔隙裂隙水为主的陇东黄土丘陵区地下水中最有利于锶的富集;地下水类型上,以中新生界碎屑岩地下水锶最易富集,而以变质岩为主的基岩裂隙水不利于锶的富集;循环特征上,以具备深循环条件的盆地型地下水系统最有利于锶的富集,而循环路径短、交替条件较强烈的局部水流系统中地下水锶偏贫。围岩中的锶丰度,决定了地下水中锶的含量,白垩系和新近系碎屑岩、古生界碳酸盐岩中锶丰度高,决定了白垩系碎屑岩地下水、新近系碎屑岩地下水和碳酸盐岩岩溶水具备锶矿泉水富集的物质条件;同时锶在地下水中富集,还与地下水所处的构造环境和地下水循环运移特征有关,盆地型的地下水流系统和进行深循环的地下水从补给区到排泄区径流距离远,循环路径长,地下水在含水层的滞留时间长,有利于锶在地下水中的溶解和富集。

关 键 词:锶矿泉水;富集环境;形成机理;水文地质调查工程;甘肃省

中图分类号:P641 **文献标志码**:A **文章编号**:1000−3657(2020)06−1688−14

A study of enrichment environment and formation mechanism of strontium mineral water in Gansu Province

ZHANG Yanlin[1], DING Hongwei[2,3], FU Donglin[4], HUANG Zengbao[1], LI Aijun[1], YAN Chengyun[1], JIN Xia[1]

(1. *Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou* 730000*, Gansu, China;* 2. *Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Lanzhou* 730000*, Gansu, China;* 3. *Gansu Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources, Lanzhou* 730000*, Gansu, China;* 4. *Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou* 730000*, Gansu, China)*

收稿日期:2019−05−07;**改回日期**:2020−02−01

基金项目:甘肃省国土资源厅项目"甘肃省矿泉水调查"与中国地质调查局项目(DD20160288)资助。

作者简介:张彦林,男,1971年生,高级工程师,主要从事水文地质环境地质调查与研究工作;E−mail: zhyl319@126.com。

Abstract: Gansu Province is located at the juncture of the four major geographical areas of China , i.e., north area, south area, northwest area and the Tibetan Plateau, and is characterized by various climates, strong geo−tectonic activities, complex topography, diverse geomorphologic forms, and complex geological and hydrogeological conditions; all these factors provide favorable conditions for forming strontium mineral water. The test and analysis of the mineral water samples from 644 water spots in the whole province show the strontium content of these mineral water are mainly in the range of 0.09−1.00 mg/L, the highest value is 15.6 mg / L, and there are 411 water points where the strontium content is higher than or equal to 0.40 mg / L, and reaches the level content of drinking natural mineral water, accounting for 58.1% of all water points; therefore, strontium is one of the most common and abundant trace elements in groundwater of Gansu Province. The statistic analysis of these testing data shows the following phenomena: the hydrogeological units which are most favorable to strontium enrichment are the Quaternary groundwater in the piedmont basin of the Hexi Corridor plain area and the Cretaceous pore and gap groundwater of clastic rock in the Loess hilly area in east Gansu Province; the type of groundwater which is likely to enrich strontium element is the Mesozoic and Cenozoic detrital groundwater rather than the fractured groundwater of bedrock in metamorphic rock area. The circulation characteristics are that the basin−type groundwater system with deep circulation conditions is most favorable to strontium enrichment, while the groundwater strontium content of the local flowing system where the circulation path is short and the alternate conditions are stronger is poor. The content of strontium in groundwater depends on the strontium abundance in surrounding rocks. Strontium abundance is higher in Cretaceous and Neogene clastic rocks and Paleozoic carbonate rocks than in the other rocks, so the groundwater in the Cretaceous and Neogene clastic rocks and the carbonate karst groundwater has certain material conditions for enrichment of strontium mineral water. At the same time, strontium accumulation in groundwater is related to the geo− tectonic environment in which the groundwater is located and the characteristics of groundwater circulation and migration. The basin− type groundwater flowing system and the groundwater for deep circulation are far away from the recharge area to the discharge area, and the circulation path is long. The retention time of groundwater is long in aquifers, which is beneficial to the dissolution and enrichment of strontium in groundwater.

Key words: strontium mineral water; enriched environment; formation mechanism; hydrogeological survey engineering; Gansu Province

About the first author: ZHANG Yanlin, male, born in 1971, senior engineer, mainly engages in hydrogeological and environment−geological investigation and research; E−mail: zhyl319@126.com.

Fund support: Supported by the Projects from Department of Land and Resources of Gansu Province (Mineral Water Survey in Gansu Province) and China Geological Survey (No. DD20160288).

1 引 言

锶是岩石圈上部含量丰富的微量元素之一(胡进武等,2002;刘庆宣等,2004;苏春田等,2017),平均丰值为375×10^{-6}。锶分布相当广泛,各类岩石中几乎均含有锶元素,特别是在含锶矿物和闪长岩、富钙花岗岩、黏土岩以及碳酸盐岩中,锶含量相对比较富集,是提供锶元素物质来源的主要母岩(许佩瑶等,1997;刘庆宣等,2004)。地下水中的锶来源于岩石中锶的溶解。锶是地壳中活跃的元素之一,无论是氧化还原环境还是酸碱环境对其溶解迁移无较大影响,决定地下水中锶含量的主要因素是岩石中锶元素含量、溶滤时间及温度条件(许佩瑶等,1997)。岩石中的锶丰度,决定了地下水中锶的含量。岩石中的锶丰度与地下水中锶的含量呈正相关关系,一般随围岩中锶丰度的增加,地下水中锶含量随之增加(刘庆宣等,2004)。

锶与人体健康关系密切,是人体生理功能所必需的微量元素之一,对维持人体生理机能具有重要意义(王增银等,2003;苏春田等,2017)。富锶矿泉水是天然饮用矿泉水中的主要类型,在全国范围内已发现或评价的各类天然饮用矿泉水点中,锶矿泉水或锶复合型矿泉水约占总数的60%以上,在部分省(市、区)占到90%以上。长期以来,锶元素在地下水中的富集环境及其形成机理一直被水文及水文地质学界所关注,先后开展过专门研究和探索,积累了丰硕的成果,但有关甘肃省地域内锶元素在水中的富集环境及其形成机理方面的研究成果鲜

有报道。笔者依托甘肃省地质调查院于2014—2015年承担完成的省国土资源厅“甘肃省矿泉水调查项目”所掌握的资料及最新水质测试分析数据，在阐述甘肃省区域水文地质条件及锶矿泉水分布特征的基础上，深入研究了锶矿泉水的富集环境和形成机理，为甘肃省天然矿泉水的开发利用奠定了基础。

2 研究区自然地理概况及水文地质条件

2.1 自然地理概况

甘肃省地处中国黄土高原、内蒙古高原和青藏高原交汇地带，即中国第一、第二级阶梯及其相交带上，是中国四大地理区（北方区、南方区、西北区和青藏高原区）的相接部位，地域辽阔而狭长，地质构造活动强烈，地层岩性复杂，地貌形态多样，山岳、盆地、高原、河谷、沙漠、戈壁相间分布；气候类型自西北向东南由大陆性干旱—半干旱气候过渡为半湿润—湿润气候。复杂的地质条件和多样的自然地理环境为锶矿泉水的形成奠定了极为有利的基础（王玉功等，2009）。

2.2 区域水文地质条件

全省划分为北山山地、河西走廊平原、祁连山山地、陇西黄土高原、陇东黄土高原和西秦岭等六大水文地质单元（图1）；受地质构造条件、地貌形态和地层岩性的控制，区内地下水类型主要分为第四系松散岩类孔隙水、中新生界碎屑岩类孔隙裂隙

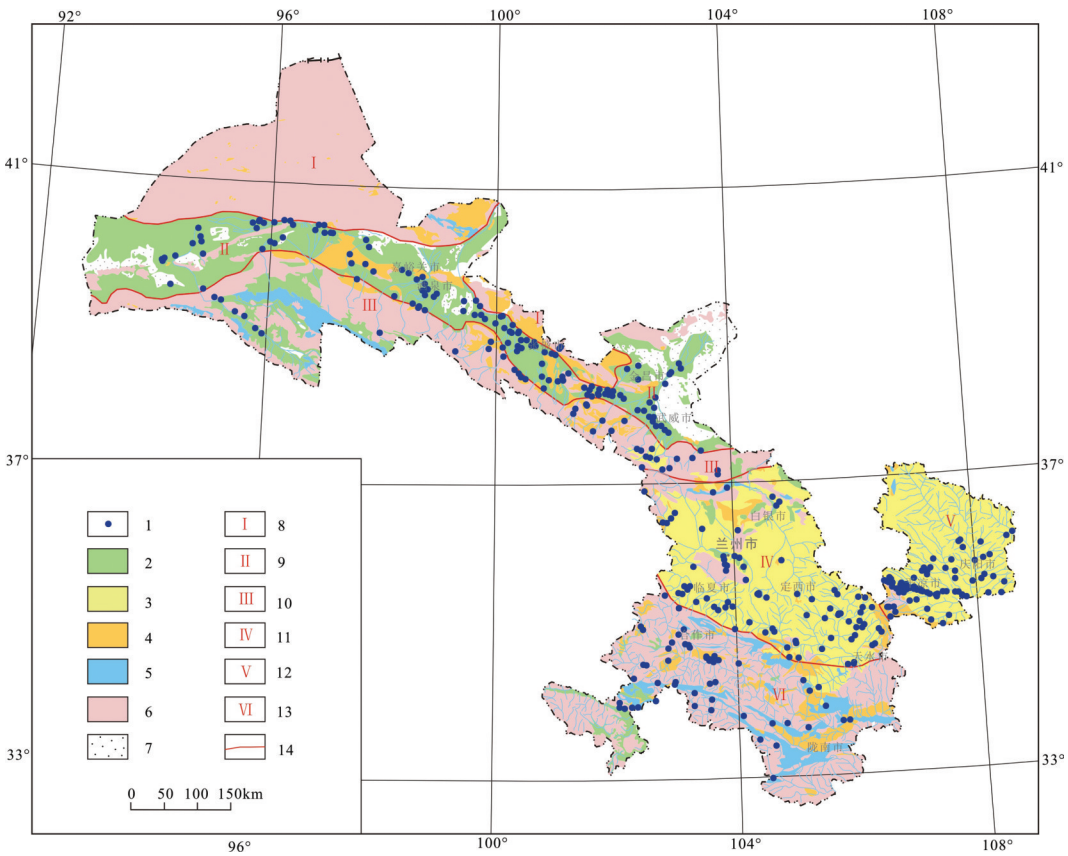

图1 甘肃省锶矿泉水点分布及水文地质略图

1—矿泉水点；2—平原松散层孔隙水；3—黄土孔隙裂隙水；4—碎屑岩孔隙裂隙水；5—碳酸盐岩岩溶水；6—基岩裂隙水；7—沙漠区；8—北山水文地质区；9—河西走廊水文地质区；10—祁连山水文地质区；11—陇西黄土高原水文地质区；12—陇东黄土高原水文地质区；13—西秦岭水文地质区；14—水文地质分区界线

Fig. 1 Distribution of strontium mineral water sites and hydrogeological sketch map of Gansu Province

1−Spring water site; 2−Pore water in loose layer of plain; 3−Loess pore and fracture water; 4−Pore and fracture water in clastic rocks; 5−Karst water in carbonate rock; 6−Bedrock fissure water; 7−Desert area; 8−Beishan hydrogeological area; 9−Hydrogeological area of Hexi Corridor; 10−Hydrogeological area of Qilian Mountain; 11−Longxi loess plateau hydrogeological area; 12−Longdong loess plateau hydrogeological area; 13−Hydrogeological area of west Qinling Mountain; 14−Boundary of hydrogeological subdivision

水、基岩类裂隙水和碳酸盐岩类岩溶水四大类。

2.2.1 第四系松散岩类孔隙水

进一步可分为平原(盆地)第四系松散层孔隙水和黄土高原黄土孔隙裂隙水，主要分布于河西走廊平原和陇西、陇东黄土高原及较大河谷地带。河西走廊平原巨厚的第四系松散岩类中赋存丰富的地下水资源，自南向北分为“扇形砾石平原潜水带”与“细土平原承压水带”，构成潜水—承压水系统；流经黄土高原的主要河流(如黄河、渭河、洮河、泾河等)河谷地带第四系松散堆积物较厚，亦赋存水量丰富的孔隙水,单井涌水量可达1000~3000 m^3/d。

陇西黄土高原黄土孔隙裂隙水的分布明显受区域降水量变化的控制，一般年降水量大于400 mm的区域黄土层普遍含水，潜水面随着地形的高低而起伏，地下水分布不连续；年降水量小于400 mm的地区黄土层多为透水不含水层。陇东黄土高原黄土孔隙裂隙水主要赋存于黄土塬区黄土层中，含水层厚度塬中心大、边缘薄，一些规模较大的塬区水量丰富，单井涌水量可达300~1000 m^3/d。

2.2.2 中新生界碎屑岩类孔隙裂隙水

分布于黄土高原和西秦岭的中新生代碎屑岩类红层盆地中，主要有靖远—会宁盆地、兰州—榆中盆地、临夏—临洮盆地、张川盆地、临潭盆地及陇东白垩系盆地等，各盆地地下水各自构成完整的承压水流系统。其中陇东白垩系盆地规模最大，为一套具有多含水层结构，水量、水质变化复杂的承压水含水岩组，总的趋势是含水层埋藏越深，水头愈高、自流量越大，水质亦越差。

2.2.3 基岩类裂隙水

主要分布于祁连山及西秦岭，在黄土高原的石质岛状山地如马啣山、华家岭、六盘山区等地亦有分布。基岩裂隙水以岩层风化构造裂隙及断裂破碎带为主要含水介质，透水性较弱，地下水分布不均匀，富水性弱。北山地区由于气候干旱，降水稀少，地表多荒漠化，基岩区多不含水。

2.2.4 碳酸盐岩类岩溶水

主要分布于西秦岭和陇东白垩系盆地西缘地区(即六盘山东麓)，在祁连山和北山地区亦有零星分布。西秦岭岩溶水主要赋存于近东西条带状展布的泥盆系—三叠系碳酸盐岩中，为裸露型岩溶水，地下水交替强烈，水量较丰富；陇东白垩系盆地西缘岩溶水呈断块状分布于近南北向展布的早古生代断裂褶皱带中，主要为覆盖及埋藏型岩溶水，地下水补径排条件较差，但在岩溶发育的构造有利部位水量亦较丰富，且水质较好。

3　水样采集与测试

3.1 样品采集

水样采集分2014年、2015年两个年度进行，其中2014年对甘肃东部地区(乌鞘岭以东)进行调查取样，2015年对甘肃省西部地区(乌鞘岭以西)进行调查取样，采集时间均在每年的5—10月，采样范围控制了六大水文地质单元和四大地下水类型，样品采集方法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；共采集644个水点的矿泉水分析样品，其中地下水样品478组，主要河流源区及泉集河构成的地表水样品166组。

3.2 样品测试

样品分析项目包括了感官指标、一般化学指标、矿泉水界限指标、矿泉水限量指标和污染指标。所取样品由甘肃地质工程实验室检测分析，在部分水点采集了平行样品送至陕西工程勘察研究院水土检测中心进行验证。样品测试方法按照《饮用天然矿泉水检验方法》(GB/T8538-2008)进行，锌、锶、锂采用火焰原子吸收分光光度法(孙岐发等，2017，2019)，硒采用氢化物发生原子吸收分光光度法，偏硅酸采用硅钼黄分光光度法。锶的检出限为0.10 mg/L，锂的检出限为0.10 mg/L，锌的检出限为0.02 mg/L，硒的检出限为0.002 mg/L，偏硅酸的检出限为2.60 mg/L。经统计分析，样品测试主要指标标准差如表1所示。

4　结果与分析

4.1 锶矿泉水数量及锶含量分布特征

根据《饮用天然矿泉水》(GB8537-2018)标准，饮用天然锶矿泉水的界限含量为≥0.20mg/L，其中锶含量在0.20~0.40 mg/L时水源水温应在25℃以上。本次调查取样的水点中除几处天然地热温泉外，其余采样点水源均为常温水，水温一般小于15℃，因而本文中将锶矿泉水的界限含量确定为≥0.40 mg/L。经统计，在测试的644个样品中锶含量介于0.09~15.6 mg/L，其中锶含量≥0.40 mg/L、达到

表1 研究区样品测试(*N*=644)主要指标标准差统计
Table 1 Statistic table of standard deviation of main indicators of sample (*N*=644) test in the study area

项目	最大值	最小值	平均值	标准差
pH值	9.8	6.6	8.0	0.4
TDS/(mg/L)	7181	93.3	640.8	664.2
Ca^{2+}/(mg/L)	505	0.8	73.0	47.0
Mg^{2+}/(mg/L)	817.2	0	44.8	59.2
Na^{+}/(mg/L)	1056	1.0	83.1	125.8
K^{+}/(mg/L)	91.6	0.5	4.0	6.0
HCO_3^{-}/(mg/L)	2569	30.5	276.9	163.2
Cl^{-}/(mg/L)	1166	0.7	72.5	140.5
SO_4^{2-}/(mg/L)	4131	0	195.4	318.6
Sr^{2+}/(mg/L)	15.6	0.09	0.87	1.07
H_2SiO_3/(mg/L)	89.8	<2.60	14.7	9.1
I^{-}/(mg/L)	0.730	<0.01	0.017	0.042
Li^{+}/(mg/L)	1.069	<0.08	0.103	0.053
Zn^{2+}/(mg/L)	1.160	<0.02	0.029	0.059
Se^{2+}/(mg/L)	0.036	<0.002	0.003	0.003

矿泉水界限含量的水点共有411个,占全部水点的58.1%(表2,图1)。进一步统计发现(图2),锶含量小于0.4 mg/L的水点共233处,占总数的36.2%;锶含量为0.4~1.0 mg/L的水点共266处,占总数的41.3%;锶含量为1.0~3.0 mg/L的水点共132处,占总数的20.5%;锶含量大于3.0 mg/L的水点仅13处,占总数的2.0%。锶含量主要集中在0.09~1.0 mg/L,共有499个水点,占总点数的77.5%。锶是甘肃省矿泉水中普遍含有并且含量较丰的微量元素之一。

4.2 锶矿泉水的区域分布特征

从411处锶矿泉水点的区域分布来看(表3),北山、祁连山及西秦岭共有锶矿泉水点103处,占全部锶矿泉水点总数的25.1%;河西走廊平原及黄土高原锶矿泉水点308处,占总数的74.9%。由此不难看出,甘肃省锶矿泉水主要集中分布于河西走廊平原和陇西、陇东黄土高原。

将各水文地质单元达到界限含量标准的锶矿泉水点占该区域取样点总数的比例代表锶矿泉水的"产出率"可以得出(图3),河西走廊平原和陇东黄土高原锶矿泉水产出率最高,分别为82.2%和80.2%;其次为北山区、祁连山区和陇西黄土丘陵区,产出率介于53.5%~61.5%;西秦岭地区最低,锶矿泉水点产出率为44.4%。河西走廊平原第四系松散岩类孔隙水和陇东白垩系碎屑岩类孔隙裂隙水中最有利于锶元素的富集。

4.3 不同水源锶矿泉水的产出特征

从研究区锶矿泉水产出的水源类型分析(表4),各类地下水产出的锶矿泉水点数量多达341处,占锶矿泉水点总数的83.0%;地表水产出的锶矿泉水点70处,占锶矿泉水点总数的17.0%。

从不同类型地下水中锶含量达到矿泉水标准水点的产出率分析(图4),碎屑岩类孔隙裂隙水锶矿泉水产出率最高达87.8%;其次为第四系松散岩类孔隙水,产出率为73.7%;基岩类裂隙水和碳酸盐岩类岩溶水产出率最低,分别为53.6%和39.4%。由此不难看出,碎屑岩类孔隙裂隙水中锶元素最易富集,而以变质岩为主的基岩裂隙水和碳酸盐岩岩溶水则锶元素相对不易富集。

进一步分析发现,区内第四系松散岩类孔隙水是锶矿泉水产出数量最多的地下水类型。其中河西

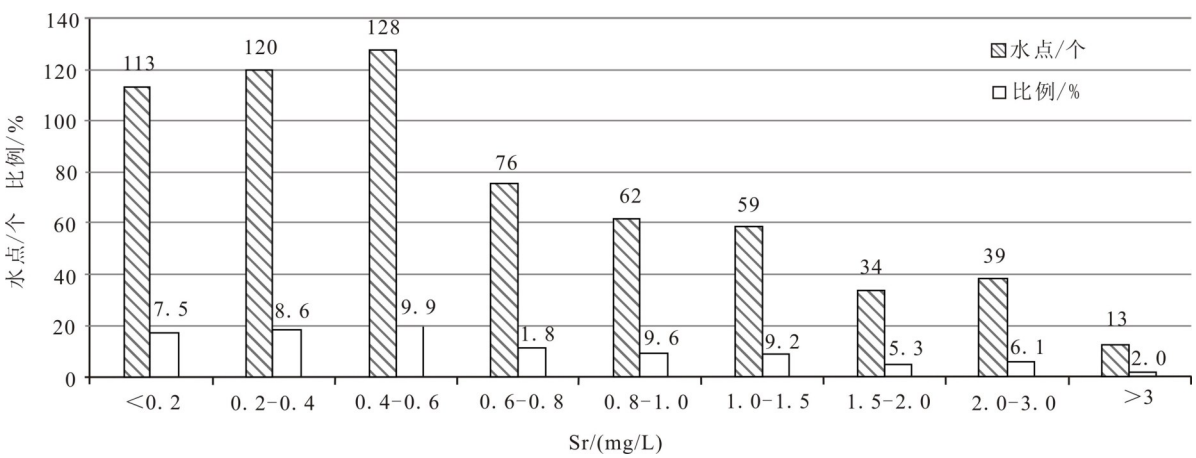

图2 研究区水点锶含量分布柱状图
Fig.2 Histogram of stepwise statistics of strontium content at water sites in the study area

表2 锶矿泉水点pH值和锶含量（mg/L）一览表

Table 2 pH and strontium content（mg/L）of the main strontium mineral water sites

序号	地点	Sr	pH	序号	地点	Sr	pH	序号	地点	Sr	pH
1	白银市会宁县	0.80	7.67	2	白银市会宁县	0.40	7.70	3	白银市景泰县	1.01	7.82
4	白银市景泰县	0.43	8.34	5	白银市景泰县	2.71	7.76	6	白银市景泰县	2.40	7.97
7	白银市靖远县	1.90	7.20	8	白银市靖远县	1.04	7.30	9	白银市平川区	1.69	7.20
10	白银市平川区	0.56	7.40	11	定西市安定区	1.53	7.43	12	定西市安定区	1.45	7.84
13	定西市安定区	2.59	8.08	14	定西市安定区	0.61	7.68	15	定西市安定区	1.47	7.85
16	定西市临洮县	1.91	7.98	17	定西市临洮县	3.52	7.62	18	定西市临洮县	1.62	7.48
19	定西市陇西县	0.52	7.37	20	定西市陇西县	1.46	7.64	21	定西市陇西县	1.94	7.32
22	定西市岷县	1.03	7.69	23	定西市通渭县	0.78	7.99	24	定西市通渭县	4.85	8.29
25	定西市通渭县	2.09	7.52	26	定西市通渭县	0.56	7.76	27	定西市通渭县	1.66	7.35
28	甘南州迭部县	1.19	8.52	29	甘南州迭部县	1.27	8.37	30	甘南州迭部县	0.40	8.48
31	甘南州迭部县	0.50	8.75	32	甘南州迭部县	2.86	8.33	33	甘南州合作市	0.50	8.02
34	甘南州合作市	0.64	8.18	35	甘南州合作市	0.53	7.75	36	甘南州临潭县	0.61	8.29
37	甘南州临潭县	1.53	8.38	38	甘南州临潭县	3.59	7.92	39	甘南州临潭县	1.61	7.94
40	甘南州临潭县	0.47	8.66	41	甘南州临潭县	4.69	8.18	42	甘南州临潭县	3.72	7.96
43	甘南州临潭县	2.79	7.98	44	甘南州临潭县	1.81	8.41	45	甘南州碌曲县	0.89	7.80
46	甘南州碌曲县	0.61	8.06	47	甘南州碌曲县	0.78	8.27	48	甘南州碌曲县	0.49	8.29
49	甘南州碌曲县	0.71	8.71	50	甘南州碌曲县	1.02	8.14	51	甘南州碌曲县	0.54	8.58
52	甘南州玛曲县	0.43	8.61	53	甘南州玛曲县	1.25	8.73	54	甘南州玛曲县	0.41	8.08
55	甘南州玛曲县	4.80	7.17	56	甘南州舟曲县	0.64	8.15	57	甘南州舟曲县	0.43	7.97
58	甘南州舟曲县	0.46	8.22	59	甘南州卓尼县	0.66	8.88	60	甘南州卓尼县	0.58	8.96
61	甘南州卓尼县	0.76	8.84	62	甘南州卓尼县	0.42	8.82	63	甘南州卓尼县	1.09	6.59
64	甘南州卓尼县	0.56	8.41	65	甘南州卓尼县	0.42	8.01	66	嘉峪关市	0.51	7.95
67	嘉峪关市	0.41	8.02	68	金昌市金川区	0.81	8.45	69	金昌市金川区	1.92	8.42
70	金昌市永昌县	0.43	8.00	71	金昌市永昌县	1.16	7.74	72	金昌市永昌县	0.57	8.16
73	金昌市永昌县	1.45	7.63	74	金昌市永昌县	0.96	8.10	75	金昌市永昌县	0.81	8.07
76	金昌市永昌县	0.97	7.91	77	金昌市永昌县	0.94	7.91	78	金昌市永昌县	1.57	7.35
79	金昌市永昌县	1.06	7.88	80	金昌市永昌县	0.86	8.07	81	金昌市永昌县	0.68	7.83
82	金昌市永昌县	1.08	7.67	83	金昌市永昌县	0.95	8.25	84	金昌市永昌县	0.62	8.31
85	金昌市永昌县	0.48	7.90	86	金昌市永昌县	0.66	8.10	87	金昌市永昌县	0.55	7.27
88	酒泉市阿克塞县	0.57	8.50	89	酒泉市敦煌市	1.32	7.87	90	酒泉市敦煌市	0.81	7.65
91	酒泉市敦煌市	1.00	7.38	92	酒泉市敦煌市	1.01	7.97	93	酒泉市敦煌市	0.61	8.02
94	酒泉市敦煌市	1.00	8.35	95	酒泉市敦煌市	0.81	8.11	96	酒泉市敦煌市	0.59	8.86
97	酒泉市敦煌市	0.59	7.62	98	酒泉市瓜州县	0.56	7.79	99	酒泉市瓜州县	0.81	7.70
100	酒泉市瓜州县	0.41	7.88	101	酒泉市瓜州县	0.99	7.24	102	酒泉市瓜州县	0.93	7.55
103	酒泉市瓜州县	0.52	8.17	104	酒泉市瓜州县	0.72	8.64	105	酒泉市瓜州县	0.61	8.19
106	酒泉市瓜州县	0.40	7.98	107	酒泉市瓜州县	0.61	7.91	108	酒泉市瓜州县	0.96	7.67
109	酒泉市瓜州县	0.62	7.62	110	酒泉市瓜州县	1.02	7.10	111	酒泉市瓜州县	0.93	7.60
112	酒泉市瓜州县	0.51	8.62	113	酒泉市金塔县	1.25	7.42	114	酒泉市金塔县	1.92	7.56
115	酒泉市金塔县	0.64	7.86	116	酒泉市金塔县	1.80	7.27	117	酒泉市金塔县	0.54	7.82
118	酒泉市金塔县	1.17	7.52	119	酒泉市肃北县	0.59	8.32	120	酒泉市肃北县	0.53	7.85
121	酒泉市肃北县	0.52	8.16	122	酒泉市肃北县	0.43	8.29	123	酒泉市肃北县	1.06	8.31
124	酒泉市肃北县	0.40	7.94	125	酒泉市肃北县	0.46	8.27	126	酒泉市肃州区	1.79	7.78
127	酒泉市肃州区	2.14	7.52	128	酒泉市肃州区	2.67	7.64	129	酒泉市肃州区	0.47	7.93
130	酒泉市肃州区	1.12	7.25	131	酒泉市肃州区	0.41	7.82	132	酒泉市肃州区	0.82	7.93
133	酒泉市玉门市	0.52	8.15	134	酒泉市玉门市	0.58	7.63	135	酒泉市玉门市	1.09	8.02
136	酒泉市玉门市	0.53	7.67	137	酒泉市玉门市	0.41	8.11	138	酒泉市玉门市	0.48	7.58
139	酒泉市玉门市	0.50	7.71	140	酒泉市玉门市	1.24	7.67	141	酒泉市玉门市	0.99	8.22
142	酒泉市玉门市	0.91	8.00	143	酒泉市玉门市	0.45	7.82	144	兰州市城关区	1.06	7.68
145	兰州市城关区	0.77	8.54	146	兰州市七里河区	0.63	7.94	147	兰州市七里河区	0.45	8.45
148	兰州市七里河区	1.57	8.00	149	兰州市七里河区	0.79	7.88	150	兰州市七里河区	0.91	8.22
151	兰州市永登县	0.50	8.00	152	兰州市永登县	0.50	7.20	153	兰州市永登县	2.23	7.50
154	兰州市永登县	1.31	7.30	155	兰州市永登县	1.10	7.40	156	兰州市榆中县	1.48	7.84
157	兰州市榆中县	2.90	8.41	158	兰州市榆中县	1.09	8.92	159	兰州市榆中县	0.40	7.80
160	兰州市榆中县	0.54	7.95	161	临夏州广河县	3.41	7.69	162	临夏州和政县	0.46	7.73
163	临夏州和政县	0.40	7.33	164	临夏州康乐县	0.62	7.92	165	临夏州康乐县	0.61	7.93
166	临夏州临夏市	1.58	7.40	167	临夏州临夏市	0.80	7.68	168	临夏州临夏市	1.68	7.22

续表2

序号	地点	Sr	pH	序号	地点	Sr	pH	序号	地点	Sr	pH
169	临夏州临夏县	0.46	8.53	170	临夏州临夏县	1.57	7.35	171	临夏州临夏县	0.43	7.66
172	临夏州临夏县	1.41	7.91	173	临夏州永靖县	0.71	8.43	174	陇南市成县	0.69	7.43
175	陇南市成县	0.42	7.52	176	陇南市宕昌县	0.77	8.14	177	陇南市礼县	0.57	7.37
178	陇南市礼县	0.82	7.35	179	陇南市礼县	0.67	8.23	180	陇南市礼县	0.92	7.42
181	陇南市两当县	0.45	7.47	182	陇南市文县	0.42	8.43	183	陇南市文县	0.87	7.33
184	陇南市文县	0.70	8.70	185	陇南市文县	2.64	8.22	186	陇南市文县	1.04	7.54
187	陇南市文县	0.53	8.08	188	陇南市西和县	0.46	8.64	189	陇南市西和县	0.64	7.78
190	陇南市西和县	0.66	7.97	191	陇南市西和县	0.97	8.01	192	平凉市崇信县	0.48	8.01
193	平凉市崇信县	1.58	7.85	194	平凉市华亭县	4.89	8.11	195	平凉市华亭县	0.58	7.42
196	平凉市华亭县	0.53	7.81	197	平凉市华亭县	0.53	8.16	198	平凉市华亭县	0.63	8.72
199	平凉市泾川县	2.39	7.52	200	平凉市泾川县	1.59	7.38	201	平凉市泾川县	1.34	8.21
202	平凉市泾川县	1.93	7.21	203	平凉市泾川县	0.64	8.03	204	平凉市泾川县	3.97	7.87
163	临夏州和政县	0.40	7.33	164	临夏州康乐县	0.62	7.92	165	临夏州康乐县	0.61	7.93
166	临夏州临夏市	1.58	7.40	167	临夏州临夏市	0.80	7.68	168	临夏州临夏市	1.68	7.22
169	临夏州临夏县	0.46	8.53	170	临夏州临夏县	1.57	7.35	171	临夏州临夏县	0.43	7.66
172	临夏州临夏县	1.41	7.91	173	临夏州永靖县	0.71	8.43	174	陇南市成县	0.69	7.43
175	陇南市成县	0.42	7.52	176	陇南市宕昌县	0.77	8.14	177	陇南市礼县	0.57	7.37
178	陇南市礼县	0.82	7.35	179	陇南市礼县	0.67	8.23	180	陇南市礼县	0.92	7.42
181	陇南市两当县	0.45	7.47	182	陇南市文县	0.42	8.43	183	陇南市文县	0.87	7.33
184	陇南市文县	0.70	8.70	185	陇南市文县	2.64	8.22	186	陇南市文县	1.04	7.54
187	陇南市文县	0.53	8.08	188	陇南市西和县	0.46	8.64	189	陇南市西和县	0.64	7.78
190	陇南市西和县	0.66	7.97	191	陇南市西和县	0.97	8.01	192	平凉市崇信县	0.48	8.01
193	平凉市崇信县	1.58	7.85	194	平凉市华亭县	4.89	8.11	195	平凉市华亭县	0.58	7.42
196	平凉市华亭县	0.53	7.81	197	平凉市华亭县	0.53	8.16	198	平凉市华亭县	0.63	8.72
199	平凉市泾川县	2.39	7.52	200	平凉市泾川县	1.59	7.38	201	平凉市泾川县	1.34	8.21
202	平凉市泾川县	1.93	7.21	203	平凉市泾川县	0.64	8.03	204	平凉市泾川县	3.97	7.87
205	平凉市泾川县	0.83	8.68	206	平凉市泾川县	0.57	8.54	207	平凉市泾川县	0.83	8.16
208	平凉市泾川县	1.03	8.20	209	平凉市泾川县	0.57	7.98	210	平凉市泾川县	0.69	7.90
211	平凉市泾川县	0.64	7.70	212	平凉市泾川县	1.85	8.61	213	平凉市泾川县	0.86	8.58
214	平凉市静宁县	2.84	8.30	215	平凉市静宁县	2.40	8.00	216	平凉市静宁县	1.22	7.60
217	平凉市静宁县	0.85	8.00	218	平凉市静宁县	0.55	7.60	219	平凉市静宁县	2.07	8.00
220	平凉市静宁县	0.42	7.80	221	平凉市静宁县	0.42	7.90	222	平凉市静宁县	0.51	8.00
223	平凉市静宁县	0.98	8.20	224	平凉市静宁县	1.23	8.00	225	平凉市静宁县	2.43	7.60
226	平凉市静宁县	2.50	8.20	227	平凉市崆峒区	2.05	7.71	228	平凉市崆峒区	2.42	7.83
229	平凉市崆峒区	0.64	7.81	230	平凉市崆峒区	0.90	7.25	231	平凉市崆峒区	1.20	7.63
232	平凉市崆峒区	0.96	8.00	233	平凉市崆峒区	0.65	8.54	234	平凉市崆峒区	1.28	7.72
235	平凉市崆峒区	1.42	7.98	236	平凉市崆峒区	0.87	8.03	237	平凉市崆峒区	0.90	8.88
238	平凉市崆峒区	0.78	7.87	239	平凉市崆峒区	1.23	8.00	240	平凉市崆峒区	2.36	8.25
241	平凉市崆峒区	0.65	8.28	242	平凉市崆峒区	1.04	7.80	243	平凉市崆峒区	2.11	8.00
244	平凉市崆峒区	0.73	8.30	245	平凉市崆峒区	0.47	8.55	246	平凉市崆峒区	0.80	8.01
247	平凉市崆峒区	1.02	7.65	248	平凉市崆峒区	2.08	8.11	249	平凉市崆峒区	2.14	8.07
250	平凉市崆峒区	0.46	8.89	251	平凉市崆峒区	0.55	8.54	252	平凉市崆峒区	0.87	8.10
253	平凉市崆峒区	0.95	8.12	254	平凉市崆峒区	0.81	8.80	255	平凉市崆峒区	2.11	8.32
256	平凉市崆峒区	0.51	8.20	257	平凉市崆峒区	1.40	7.27	258	平凉市崆峒区	0.61	7.97
259	平凉市崆峒区	0.47	8.14	260	平凉市灵台县	0.79	7.96	261	平凉市灵台县	0.92	7.61
262	平凉市灵台县	1.07	8.51	263	平凉市灵台县	0.82	7.96	264	平凉市灵台县	0.64	9.03
265	平凉市庄浪县	0.72	7.95	266	平凉市庄浪县	2.57	7.30	267	平凉市庄浪县	1.04	7.67
268	平凉市庄浪县	1.02	8.31	269	平凉市庄浪县	1.68	7.87	270	平凉市庄浪县	0.54	8.50
271	庆阳市合水县	0.95	7.58	272	庆阳市合水县	0.50	8.62	273	庆阳市合水县	0.59	7.83
274	庆阳市合水县	0.67	8.42	275	庆阳市合水县	0.72	8.02	276	庆阳市合水县	0.94	8.12
277	庆阳市宁县	0.84	7.84	278	庆阳市宁县	1.02	8.10	279	庆阳市宁县	1.96	7.34
280	庆阳市宁县	1.45	7.66	281	庆阳市宁县	4.00	8.35	282	庆阳市庆城县	1.27	8.88
283	庆阳市庆城县	2.56	7.74	284	庆阳市庆城县	2.19	7.86	285	庆阳市西峰区	2.16	8.52
286	庆阳市西峰区	0.66	8.16	287	庆阳市西峰区	0.47	8.32	288	庆阳市西峰区	0.62	8.15
289	庆阳市镇原县	2.13	7.83	290	庆阳市镇原县	2.93	8.15	291	庆阳市镇原县	2.16	8.25
292	庆阳市镇原县	0.90	8.05	293	庆阳市镇原县	2.22	8.32	294	庆阳市镇原县	10.10	7.78

续表2

序号	地点	Sr	pH	序号	地点	Sr	pH	序号	地点	Sr	pH
295	庆阳市镇原县	0.85	8.38	296	庆阳市镇原县	15.60	8.35	297	庆阳市正宁县	1.03	7.83
298	庆阳市正宁县	0.70	8.55	299	庆阳市正宁县	1.87	7.73	300	天水市甘谷县	2.26	7.22
301	天水市麦积区	0.68	8.01	302	天水市麦积区	0.86	7.78	303	天水市麦积区	2.21	7.67
304	天水市麦积区	0.87	7.79	305	天水市秦安县	1.95	7.34	306	天水市秦安县	1.57	8.67
307	天水市清水县	0.64	7.55	308	天水市清水县	0.94	7.66	309	天水市清水县	7.14	8.01
310	天水市清水县	0.47	7.97	311	天水市清水县	0.51	7.98	312	天水市张家川县	0.50	8.00
313	天水市张家川县	0.74	7.90	314	天水市张家川县	1.01	8.47	315	天水市张家川县	0.41	8.24
316	天水市张家川县	0.55	8.38	317	武威市古浪县	0.55	7.83	318	武威市古浪县	0.43	7.92
319	武威市古浪县	0.94	7.54	320	武威市古浪县	1.27	7.94	321	武威市凉州区	0.72	7.58
322	武威市凉州区	1.18	7.44	323	武威市凉州区	0.62	7.65	324	武威市凉州区	0.63	8.01
325	武威市凉州区	0.53	7.60	326	武威市凉州区	0.62	8.24	327	武威市凉州区	0.75	7.75
328	武威市凉州区	0.97	7.66	329	武威市凉州区	0.67	8.01	330	武威市凉州区	0.44	8.12
331	武威市凉州区	1.59	7.44	332	武威市凉州区	0.64	7.95	333	武威市凉州区	0.72	7.69
334	武威市民勤县	0.44	8.14	335	武威市民勤县	0.55	8.45	336	武威市民勤县	1.55	7.66
337	武威市民勤县	2.23	7.32	338	武威市民勤县	1.89	7.26	339	武威市民勤县	0.53	8.22
340	武威市民勤县	0.58	7.90	341	武威市天祝县	1.11	7.12	342	武威市天祝县	0.53	8.40
343	武威市天祝县	0.51	7.88	344	武威市天祝县	0.61	7.93	345	武威市天祝县	0.44	8.24
346	武威市天祝县	1.93	7.33	347	武威市天祝县	0.41	8.59	348	武威市天祝县	0.77	7.00
349	张掖市甘州区	0.96	7.71	350	张掖市甘州区	0.48	8.10	351	张掖市甘州区	0.53	8.10
352	张掖市甘州区	0.43	8.10	353	张掖市甘州区	0.75	8.32	354	张掖市甘州区	0.48	8.52
355	张掖市甘州区	0.69	7.81	356	张掖市甘州区	2.17	7.61	357	张掖市甘州区	0.76	7.93
358	张掖市甘州区	0.51	8.23	359	张掖市甘州区	0.47	7.89	360	张掖市甘州区	0.87	7.49
361	张掖市甘州区	0.66	8.10	362	张掖市甘州区	0.94	7.61	363	张掖市甘州区	0.47	7.89
364	张掖市甘州区	0.72	7.62	365	张掖市高台县	0.91	7.90	366	张掖市高台县	0.86	8.31
367	张掖市高台县	0.89	8.42	368	张掖市高台县	0.74	8.38	369	张掖市高台县	1.52	7.15
370	张掖市临泽县	0.80	7.90	371	张掖市临泽县	0.78	7.95	372	张掖市临泽县	0.65	8.01
373	张掖市临泽县	1.02	7.88	374	张掖市民乐县	0.70	7.16	375	张掖市民乐县	0.46	8.18
376	张掖市民乐县	0.45	7.60	377	张掖市民乐县	0.40	8.31	378	张掖市民乐县	0.42	8.22
379	张掖市山丹县	0.60	8.48	380	张掖市山丹县	0.46	8.30	381	张掖市山丹县	1.19	8.20
382	张掖市山丹县	1.14	8.10	383	张掖市山丹县	2.01	8.00	384	张掖市山丹县	0.57	8.02
385	张掖市山丹县	0.46	8.52	386	张掖市山丹县	0.53	8.07	387	张掖市山丹县	1.40	8.41
388	张掖市山丹县	0.40	8.00	389	张掖市山丹县	0.48	7.50	390	张掖市山丹县	0.51	7.70
391	张掖市山丹县	0.94	8.60	392	张掖市肃南县	1.46	7.82	393	张掖市肃南县	0.98	8.07
394	张掖市肃南县	0.41	7.82	395	张掖市肃南县	0.44	8.01	396	张掖市肃南县	0.52	8.21
397	张掖市肃南县	0.61	8.21	398	张掖市肃南县	1.36	8.13	399	张掖市肃南县	0.52	8.16
400	张掖市肃南县	0.43	8.41	401	张掖市肃南县	0.81	8.28	402	张掖市肃南县	0.44	7.95
403	张掖市肃南县	0.65	8.00	404	张掖市肃南县	0.41	8.06	405	张掖市肃南县	0.46	8.06
406	张掖市肃南县	0.54	8.14	407	张掖市肃南县	1.83	7.50	408	张掖市肃南县	2.40	7.45
409	张掖市肃南县	0.66	8.22	410	张掖市肃南县	2.96	8.07	411	张掖市肃南县	0.62	8.05

走廊平原松散岩类孔隙水中产出的锶矿泉水点数量最多，达126处，占第四系松散岩类孔隙水中产出锶矿泉水总数的49.6%，锶矿泉水产出率高达82.9%；其次为河谷平原松散岩类孔隙水，产出的锶矿泉水点88处，占第四系松散岩类孔隙水中产出锶矿泉水点的34.6%，锶矿泉水产出率为80.0%；黄土孔隙裂隙水中产出的锶矿泉水点23处，占第四系松散岩类孔隙水锶矿泉水点的8.3%，锶矿泉水产出率为69.7%；沟谷区孔隙水产出的锶矿泉水点40处，占第四系地下水中锶矿泉水点15.7%，锶矿泉水产出率仅为49.4%(图5)。由此可以看出，具备深循环条件的平原区地下水最有利于锶元素的富集，其次为较大型的河谷区，而循环路径短且交替强烈的黄土丘陵区孔隙裂隙水和沟谷区地下水锶元素相对偏贫。

5　锶矿泉水的形成机理

5.1　碎屑岩类孔隙裂隙锶矿泉水的形成机理

全国范围内，赋存于碎屑岩中的地下水是富锶地下水类型之一(刘庆宣等，2004)。从甘肃省调查取样分析结果来看，中新生界碎屑岩孔隙裂隙水中锶含量高，在采集的41处水点中，含量在0.10~15.6 mg/L之间，平均值1.98 mg/L，是各类地下水中锶平均含量最高的地下水类型，也表明研究区碎屑岩地下水锶含量高的特征与全国范围内情况一致。碎

表3 研究区水文地质单元锶矿泉水点统计

Table 3 Statistical table of strontium mineral water sites in different hydrogeological units in the study area

水文地质单元	调查点数/占调查点总数比例	锶矿泉水点/占锶矿泉水点总数比例
北山	13个/2.0%	8个/1.9%
河西走廊平原	146个/22.7%	120个/29.2%
祁连山	72个/11.2%	43个/10.5%
陇西黄土高原	185个/28.7%	99个/24.1%
陇东黄土高原	111个/17.2%	89个/21.7%
西秦岭	117个/18.2%	52个/12.7%
合计	644个/100%	411个/100%

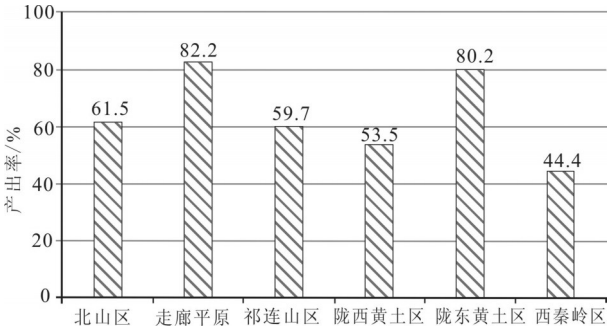

图3 研究区不同水文地质单元锶矿泉水产出率统计图

Fig.3 Statistical charts of ratio of strontium mineral water in different hydrogeological units in the study area

表4 研究区不同水源锶矿泉水点统计

Table 4 Statistical table of strontium mineral water sites in different water sources in the study area

水源类型	调查点数/占调查点总数比例	锶矿泉水点/占锶矿泉水点总数比例
松散岩类孔隙水	376个/58.4%	277个/67.4%
碎屑岩类孔隙裂隙水	41个/6.4%	36个/8.8%
基岩类裂隙水	28个/4.3%	15个/3.6%
碳酸盐岩类岩溶水	33个/5.1%	13个/3.2%
地表水	166个/25.8%	70个/17.0%
合计	644个/100%	411个/100%

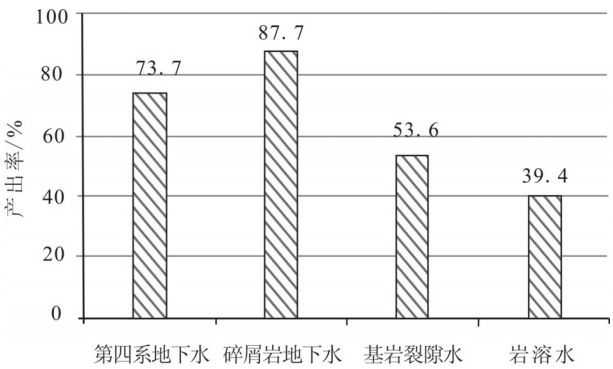

图4 研究区各类型地下水锶矿泉水产出率

Fig. 4 Output ratio of strontium mineral water in different types of groundwater in the study area

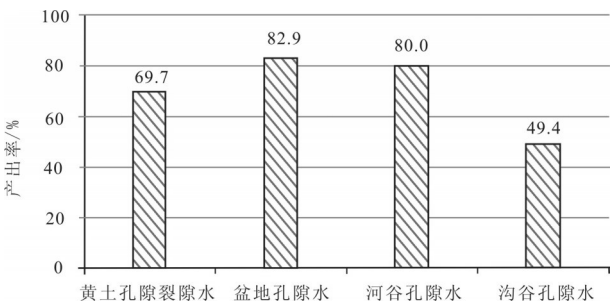

图5 研究区第四系地下水锶矿泉水点产出率

Fig. 5 Output ratio of strontium mineral water sites in different Quaternary groundwater in the study area

屑岩孔隙裂隙富锶矿泉水主要集中分布在陇东白垩系盆地碎屑岩的潜水和承压水中，其次为分布在陇西黄土丘陵区的张川、临夏和永登龙泉等新近系盆地碎屑岩中，在西秦岭地区的临潭—新城新近系盆地、北山地区的红寺湖地区白垩系碎屑岩构造盆地中也集中产出。

勘探和研究证实，区内白垩系和新近系岩性主要为河湖相或山麓相堆积形成的砂岩、砂质泥岩、泥岩及砂砾岩等碎屑岩类，碎屑间填隙物以黏土矿物为主，各层中不同程度含有石膏层。碎屑岩地下水中锶矿泉水的富集与其富含膏盐层有密切关系。锶大多分布于造岩矿物中，难以形成独立矿物，均为含锶矿物，其中主要含锶矿物之一为天青石(Sr，Be，Ca)[SO_4]，常出现在与钙、镁等元素性质相近的含石膏黏土层中，中国产出的固体锶矿也主要集中在古近系古新统含膏盐沉积层和新近系上新统黏土岩中，如四川干沟，玉峡，云南金顶，湖北狮子立山等(魏荣道等，2005)。天青石中锶的溶解主要通过水化作用和水解作用。天青石在风化作用下，不时被水浸透，在矿物表面形成含水矿物，使矿物体积增大并失去光泽，结构变得疏松，如此反复，岩石最终水化作用成细粒物质，有利于地下水与含锶矿物的充分接触，为锶的溶解提供了条件(樊有俊等，2010)。

$$SrSO_4+2H_2O \rightarrow SrSO_4 \cdot 2HO$$

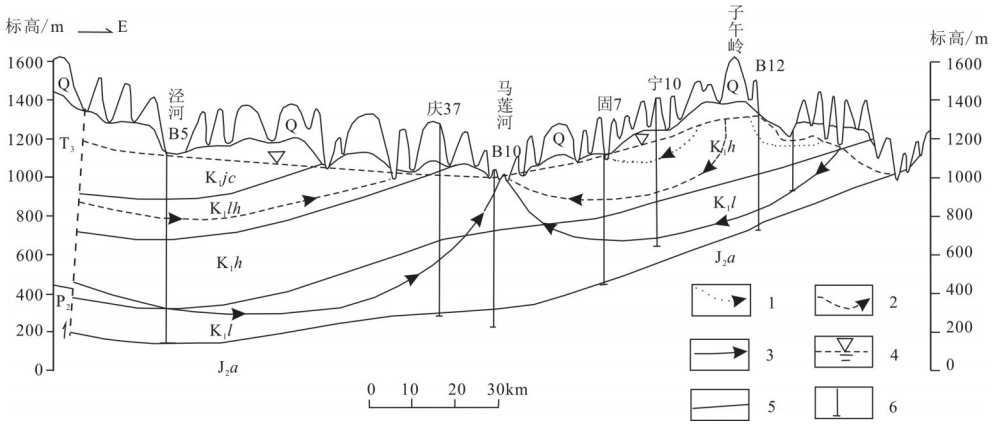

图6 陇东盆地东西向水文地质剖面图

1—局域水流系统；2—中间水流系统；3—区域水流系统；4—水位；5—含水岩组界线；6—钻孔

Fig.6 The EW-striking hydrogeological section of Longdong Basin

1−Local groundwater flow system; 2−Intermediate groundwater flow system; 3−Regional groundwater flow system; 4−Water level; 5−Boundary of water−bearing rock group; 6−drill hole

当如果水中含有氯化物时，$SrSO_4$会形成可溶性的$SrCl_2$而溶于水（许佩瑶等，1997）。

$SrSO_4+HCl \rightarrow SrCl_2+H_2SO_4$

碎屑岩地下水中锶矿泉水富集，除与含水岩层锶丰度高紧密相关外，还与该类水所处的沉积盆地型构造环境和地下水深循环运移特征有关。区内无论是白垩系地下水，还是新近系地下水，均处于中新生界盆地中。沉积盆地型构造环境决定岩层多呈近水平状产出，同时大多具有向斜构造特征，岩层组成具有粗细交替、重复叠置的多层层状结构，这种重复叠置的多层地质结构决定了地下水含水层的多层性、承压性、层与层的相对封闭性（刘心彪等，2009）。受盆地型构造控制，地下水一般在盆地周边接受补给，包括大气降水入渗补给和基岩裂隙水、岩溶水的侧向补给，径流方向从盆地边缘向中心、从上游向下游顺层流动，排泄主要在下游河流切穿含水层地段溢出或侧向排泄于松散层含水层，同时也有在盆地中心或下游沿“天窗”顶托溢出或人工开采排泄的，这样从盆地上游边缘到盆地中心或下游构成一个完整的地下水深循环补径排系统（图6）（魏荣道等，2005；刘心彪等，2007）。由于碎屑岩层透水性较差，决定了地下水在水平径流运移过程中，径流速度缓慢，地下水在含水层中滞留时间长，有利于水岩作用进行，加大了含水层中锶的溶解，从而决定了碎屑岩地下水中锶的富集。

5.2 岩溶锶矿泉水的形成机理

全国范围内碳酸盐岩中锶含量高，碳酸盐岩中产出的锶矿泉水点数量也较多，为锶矿泉水富集的围岩类型（许佩瑶等，1997；胡进武等，2002；刘庆宣等，2004；苏春田等，2017）。碳酸盐岩富含锶主要与其含有另一个锶的主要矿物——锶垩石（$SrCO_3$）有关。在水中的CO_2作用下，$SrCO_3$可分解为可溶性的$Sr(HCO_3)_2$从而进入地下水中。

$SrCO_3+H_2O+CO_2 \rightarrow Sr(HCO_3)_2$

水中含有NaCl时，$SrCO_3$还会形成可溶性的$SrCl_2$而溶于水（许佩瑶等，1997）。

$SrCO_3+NaCl \rightarrow SrCl_2+Na_2CO_3$

区内岩溶水主要集中分布在西秦岭和陇东盆地西缘两个区域。陇东盆地西缘岩溶水采集6个水点样品，锶含量0.27~2.05 mg/L，平均值达0.815 mg/L，达到饮用矿泉水标准的水点达83.3%；西秦岭地区共采集25个水点岩溶水样品，达到饮用矿泉水标准的水点7个，仅占总采样点数的28%。两个区域地下水锶的含量差异明显，表明不同构造背景、不同气候环境、不同循环特征的岩溶水锶含量差异很大。

西秦岭和陇东盆地西缘在大地构造上分别处于华南板块和华北板块两大构造单元，前者为晚古生代—三叠纪造山带，岩溶含水层主要为泥盆—三叠纪碳酸盐岩，多呈裸露状；后者为早古生代褶皱带，岩溶含水层主要为寒武纪、奥陶纪碳酸盐岩，多

呈覆盖型或隐藏型。气候类型上两者分别处于湿润—半湿润气候区和半湿润—半干旱气候区，前者降水较充沛，后者降水稀少。水文条件上西秦岭地区地表河系发育，表层水交替强烈；陇东盆地西缘地区地表水较贫乏，浅循环作用较弱。受气候及水文条件影响，两大地区岩溶发育有很大差异，分属传统上的“南方岩溶”和“北方岩溶”。西秦岭岩溶区溶洞和地下河系发育，表现为“洞隙型”含水介质，地下水具有与地表水相似的水文型特征，交替强烈，径流路径短，补排迅速，地下水从岩溶夷平面入渗补给，沿洞隙径流，到沟谷底泉口排泄，一般在一个水文年内完成，时间短的仅数日至数十日；陇东盆地西缘地区岩溶发育较弱，含水介质表现为“裂隙岩溶型”，主要由溶蚀空洞和裂隙共同构成，地下河系发育程度低，地下交替较弱，循环缓慢，从岩溶裸露区接受大气降水补给，沿地下岩溶裂隙径流，循环路径长，地下水在含水层中滞留时间长，多为形成时间较长“老水”（张彦林等，2005，2006）。

受岩溶水循环特性影响，陇东盆地西缘覆盖型或埋藏型的深层岩溶水锶含量高，为锶矿泉水的富集类型；西秦岭地区的洞隙及地下河等强径流型的岩溶水锶含量很低，为锶矿泉水的贫乏区。表明锶在地下水中富集，除围岩中锶含量丰富以外，还需地下水在含水层中有较长的运移循环时间，这有利于锶在地下水中溶解和富集。而西秦岭岩溶水主要为地下河型或洞隙型，地下管道发育，地下水补排迅速，地下水在含水层中的滞留时间短，不利于围岩中锶的析出，地下水中锶贫乏。

5.3 第四系松散岩类孔隙锶矿泉水的形成机理

盆地型平原区地下水中锶最富集，主要得益于地下水从补给区—径流区—排泄区构成一个完整的区域地下水流系统，地下水通过深部运移进行循环（李文鹏等，1999），径流路径长，地下水在含水层中滞留时间长，有利于锶的溶解和累积；黄土高原大型河流的河谷地带，地下水流缓慢，径流路径较长，为含水层中锶的溶解和富集提供了有利条件，也是锶矿泉水较富集的第四系地下水类型；黄土丘陵区孔隙裂隙水和沟谷区孔隙水多处于小尺度的局部水流系统，一般每一条沟谷、每一个汇水区构成一个独立的水文地质单元，地下水从补给区到排泄区径流途径短、交替较强烈、在含水层中的滞留时间短，锶偏贫。也就是说，第四系地下水在含水层中的滞留时间越长，径流循环路径越远，越有利于含水层中锶的溶解和累积；而地下水在含水层补排迅速、循环路径短，越不利于地下水中锶的积累。

根据河西走廊三大流域自上游（地下水补给区）至下游（地下水排泄区）典型剖面锶含量变化趋势分析(图7~图9)，地下水锶含量均表现为从低到高逐渐升高的变化趋势。

上游祁连山区，无论是地表水还是地下水均来源于大气降水和冰雪融水的入渗补给形成，其形成时间及径流路径短，地下水溶滤地层中的锶元素有限，故地下水中的锶含量较低，如石羊河流域的哈溪镇、黑河流域的朱陇关—冰沟口、疏勒河流域的昌马大坝等地带；进入走廊山前倾斜平原，第四系地下水主要为出山地表径流的入渗补给形成，该区含水层厚度大、颗粒粗，地下水径流条件好，水在含水

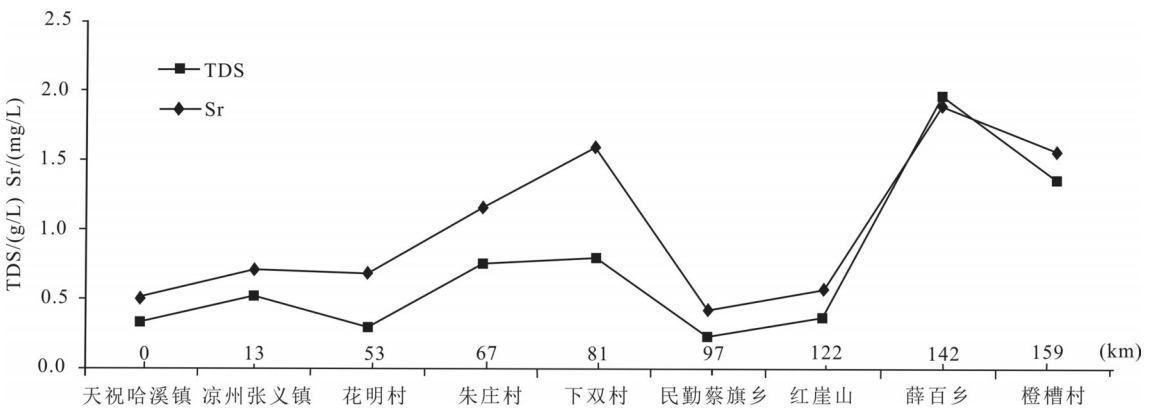

图7 石羊河流域祁连山区—民勤盆地地下水锶含量变化

Fig. 7 Strontium content of groundwater in Qilian Mountain-Minqin Basin, Shiyang River

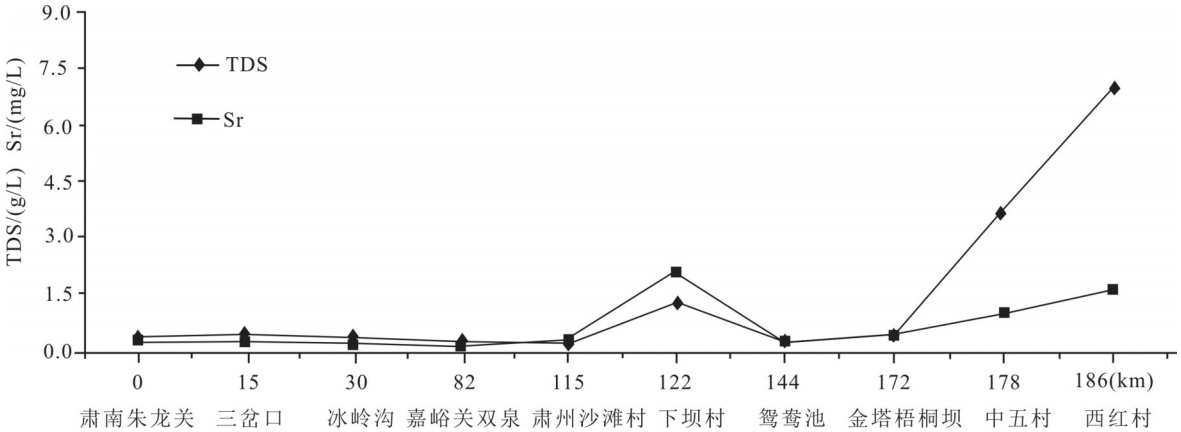

图8 黑河流域(北大河)祁连山区—金塔盆地地下水锶含量变化

Fig. 8 Strontium content of groundwater in Qilian Mountain−Jinta basin, Beida River, Heihe river

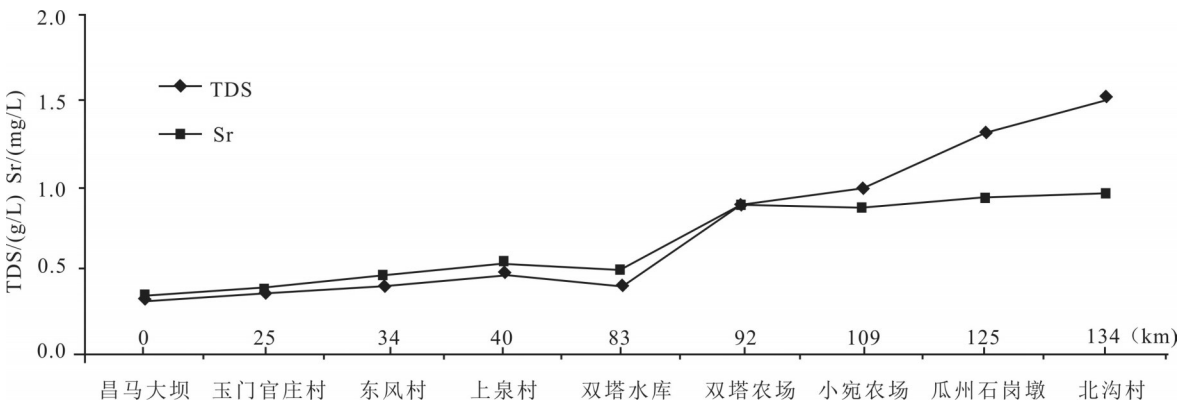

图9 疏勒河流域昌马大坝—瓜州盆地地下水锶含量变化

Fig. 9 Strontium content of groundwater in Changma Daba−Guazhou Basin along Shule River

层中的滞留时间短，对锶元素的溶滤少，故地下水锶含量尽管较山区有所增加，但仍普遍小于0.4 mg/L的界限标准，如石羊河流域的凉州区花明村、疏勒河流域的玉门市官庄村等地带；进入走廊细土平原，随着地下水力坡度的减弱和径流速度减缓，地下水的溶滤作用显著增强，对锶元素的溶滤作用加大，使得地下水锶含量明显增大至普遍大于0.4 mg/L的界限标准，如石羊河流域武威盆地的朱庄村—下庄村一带、黑河流域酒泉盆地的肃州区下坝村一带、疏勒河流域玉门—锁阳城盆地的东风村—上泉村一带等；在中游盆地与下游盆地过渡地带，由于基底抬升，第四系含水层厚度减薄，地下水浅埋，其与地表水的垂向交替作用加强，故水中的锶含量普遍出现降低的现象，如石羊河流域的民勤县蔡旗乡—红崖山一带、疏勒河流域的双塔水库一带等；进入下游盆地区，随着沉积盆地厚度再次加大和地层颗粒逐渐变细，地下水径流渐缓，水位埋深渐浅，水循环强度渐弱，地下水溶滤时间充分，局部甚至处于滞留状态存在垂向蒸发浓缩作用，使得这一地带地下水中的锶含量达到最大，如石羊河流域民勤盆地的薛百乡—橙槽村一带、黑河流域金塔盆地的中五村—西红村一带、疏勒河流域瓜州盆地的双塔农场—北沟村一带等，锶含量普遍达到1.0 mg/L以上，最大达3.0~10.0 mg/L。

进一步统计发现，河西走廊平原随着地下水径流路径的增大，地下水锶含量与溶解性总固体同步增大，二者之间呈明显的正相关(图10)。表明这一地带第四系地下水在循环演化过程中，锶与其他可溶性盐分共同在增加(丁宏伟等，2005；武冬冬等，2017)，这显然是地下水不断溶滤地层中可溶性盐分的结果。由此，可以得出这样一个结论：地下水在含水层中的滞留时间越长，径流循环路径越远，越有利于含水层中锶的溶解和累积。

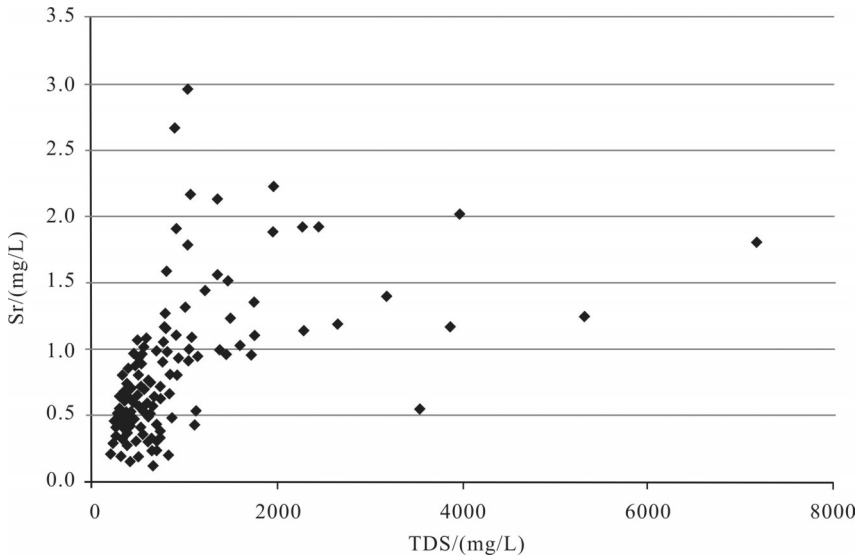

图10 河西地区第四系地下水锶与溶解性总固体关系统计图

Fig. 10 Statistical chart of the correlation between strontium and total dissolved solids in Quaternary groundwater in Hexi Corridor plain area

6 结 论

(1)研究区调查采集的644个水点中,锶含量主要集中在0.09~1.00 mg/L,锶含量最高值达15.6 mg/L,锶含量≥0.40 mg/L、达到饮用天然矿泉水界限含量的水点共有411个,占全部水点的58.1%。锶是甘肃省地下水中普遍含有并且含量较丰的微量元素之一。

(2)研究区锶矿泉水点主要集中分布在河西走廊平原、陇西黄土高原和陇东黄土高原三大水文地质单元,北山、祁连山和西秦岭锶矿泉水点分布数量少。河西走廊平原第四系松散岩类孔隙水和陇东白垩系碎屑岩类孔隙裂隙水中最有利于锶元素的富集,西秦岭地区地下水中最不利于锶的富集。

(3)从不同类型地下水中锶含量达到矿泉水标准水点的产出率分析,碎屑岩类孔隙裂隙水锶矿泉水产出率最高达87.8%;其次为第四系松散岩类孔隙水,产出率为73.7%;基岩类裂隙水和碳酸盐岩类岩溶水产出率最低,分别为53.6%和39.4%。碎屑岩类孔隙裂隙水中锶元素最易富集,而以变质岩为主的基岩裂隙水和碳酸盐岩岩溶水则锶元素相对不易富集。

(4)甘肃省锶矿泉水的形成机理与地下水所处的构造环境和地下水循环运移特征密切相关。无论是碎屑岩类孔隙裂隙水、岩溶水还是第四系松散岩类孔隙水,具备盆地型地下水流系统和进行深循环的地下水从补给区到排泄区径流距离远,循环路径长,地下水在含水层的滞留时间长,有利于锶在地下水中的溶解和富集;而小区域的局部地下水流系统,地下水径流路径短,补排迅速,交替强烈,地下水在含水层中的滞留时间短,不利于围岩中锶的析出和累积。

(5)锶矿泉水的形成和富集,主要由含水层围岩中的锶含量和地下水的循环条件决定,含水层围岩的锶含量是锶矿泉水富集的物质基础,地下水的循环条件决定了含水层围岩中锶的溶滤量。

References

Ding Hongwei, Zhang Ju. 2005. Goechemical properties and evolution of groundwater beneath the Hexi corridor, Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 22(1):24−28(in Chinese with English abstract).

Fan Youjun, Fan Shufang, Ren He. 2010.Genetic study of the rich strontium content in water quality of Heihe River Basin[J]. Popular Science & Technology, 12(10): 132−133(in Chinese).

Hu Jinwu, Wang Zengyin, ZhouLian, Wang Yusong. 2004. Hyrogeochemical characteristics of the strontium in karst water. Carsologica Sinica, 23(1):37−42(in Chinese with English abstract).

Li Wenpeng, Hao Aibing. 1999. Groundwater formation evolves mode and its meanings in the dry basin of the northwest in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 26(4):28− 32(in Chinese with English abstract).

Liu Qingxuan, Wang Guiling, Zhang Fawang.2004.Geochemical environment of trace element strontium (Sr) enriched in mineral waters[J]. Hydrogeology & Engimeering Geology, 31(6):19−23(in Chinese with English abstract).

Liu Xinbiao, Zhang Yanlin, Wang Yanjiang, Zhou Bin. 2007. Analysis of hydrochemistry characteristic in the Longdong basin[J].Geology of Chemical Minerals, 29(4):237− 241(in Chinese with English abstract).

Liu Xinbiao, Zhang Yanlin, Wang Yanjiang, Zhou Bin. 2009. Evaluation of the movement of cretaceous groundwater beneath the Longdong basin[J].Arid Zone Research, 26(2):176−180(in Chinese with English abstract).

Su Chuntian, Zhang Fawang, Xia Riyuan, Yao Xin, Zou Shengzhang, Luo Fei, Zhao Guangshuai, Yang Yang, Ba Junjie, Li Xiaopan. 2017. A study of the water−rock interaction of large rich Sr mineral spring in Xintian, Hunan Province[J]. Geology in China, 44(5):1029−1030(in Chinese with English abstract).

Su Chuntian, Huang Chenhui, Zou Shengzhang, Xie Daixing, Zhao Guangshuai, Tang Jiansheng, Luo Fei, Yang Yang. 2017. Enrichm entenvironment and sources of strontium of groundwater in Xintian county, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 36(5):678− 683(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).

Wang Yugong, Chen Yueyuan, Wang Jianbo. 2009. Development of natural mineral water in Gansu Province[J]. Gansu Geology, 18 (1): 60−65(in Chinese with English abstract).

Wang Zengyin, Liu Juan, Wang Tao, Wang Yusong, Hu Jinwu. 2003. Application advances of strontium geochemistry in hydrogeology research[J]. Geological Science and Technology Information, 22(4): 91−95 (in Chinese with English abstract).

Wei Rongdao, Yao Baogui. 2005. Discussions of the Distrbution characteristics and genesis of the tertiary confined water and its strontium mineral waters in longquan of Yongdeng County, Gansu province[J].Acta Geologica Gansu, 14(1):86− 90(in Chinese with English abstract).

Wu Dongdong, Kang Weidong, Wang Wenxiang, An Yonghui, Shao Xinmin, Li Wenpeng. 2017. Study on Sr geochemistry characteristics of groundwater in Zhangye basin[J].Water Resources and Power, 35(4):41−45(in Chinese with English abstract).

Xu Peiyao, Ding Zhinong. 1997. Formation of potable natural mingeral spring water congtaining strontium[J].Site Investigation Science and Technology, 15(5):36− 38(in Chinese with English abstract).

Zhang Yanlin, Li Shengyong, Cui Xudong, Liu Xinbiao. 2005. The geological features analysis of karst in eastern foot of Liupan montain[J]. Acta Geologica Gansu, 14(1):71− 75(in Chinese with English abstract).

Zhang Yanlin, Li Shengyong, Fu Donglin, Cui Xudong. 2006. Formation mechanism of karst groundwater Longdong basin, northwestern China[J]. Geology in China, 33(6):1393− 1399(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

丁宏伟, 张举.2005.河西走廊地下水水化学特征及其演化规律[J].干旱区研究, 22(1):24−28.

樊有俊, 樊姝芳, 任河.2010.黑河流域水质锶含量丰富成因研究[J].大众科技, 12(10):132−133.

胡进武, 王增银, 周炼, 汪玉松.2004.岩溶水锶元素水文地球化学特征[J].中国岩溶, 23(1):37−42.

李文鹏, 郝爱兵.1999.中国西北干旱盆地地下水形成演化模式及其意义[J].水文地质工程地质, 26(4):28 − 32.

刘庆宣, 王贵玲, 张发旺.2004.矿泉水中微量元素锶富集的地球化学环境[J].水文地质工程地质, 31(6):19−23.

刘心彪, 张彦林, 王延江, 周斌.2007.陇东盆地地下水水化学特征分析[J].化工矿产地质, 29(4):237−241.

刘心彪, 张彦林, 王延江, 周斌.2009.陇东盆地白垩系地下水运移研究[J].干旱区研究, 26(2):176−180.

苏春田, 张发旺, 夏日元, 姚昕, 邹胜章, 罗飞, 赵光帅, 杨杨, 巴俊杰, 李小盼.2017.湖南新田发现大型富锶矿泉水及机理研究[J].中国地质, 44(5):1029−1030.

苏春田, 黄晨晖, 邹胜章, 谢代兴, 赵光帅, 唐建, 罗飞, 杨杨.2017.新田县地下水锶富集环境及来源分析[J].中国岩溶, 36(5):678−683.

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.

王玉功, 陈月源, 王建波.2009.甘肃省天然矿泉水开发利用现状分析与可持续发展[J].甘肃地质, 18 (1):60−65.

王增银, 刘娟, 王涛, 汪玉松, 胡进武.2003.锶元素地球化学在水文地质研究中的应用进展[J].地质科技情报, 22(4):91−95.

魏荣道, 姚宝贵.2005.甘肃永登龙泉第三系锶型承压矿泉水分布特征与成因探讨[J].甘肃地质学报, 14(1):86−89.

武冬冬, 康卫东, 王文祥, 安永会, 邵新民, 李文鹏.2017.张掖盆地地下水锶元素地球化学特征研究[J].水电能源科学, 35(4):41−44.

许佩瑶, 丁志农.1997.含锶饮用天然矿泉水的形成[J].勘察科学技术, 15(5):36−38.

张彦林, 李生永, 崔旭东, 刘心彪.2005.六盘山东麓地区岩溶地质特征分析[J].甘肃地质学报, 14(1):71−75.

张彦林, 李生永, 付东林, 崔旭东.2006.陇东盆地西部岩溶地下水形成机制研究[J].中国地质, 33(6):1393−1399.