

Source Analysis of Sr Mineral Water in Mianzhu Guanyin Spring in Northwest Sichuan Basin

Yixuan Wang^{1,2}, Duoyi Wang^{1,2}, Yinhui Zuo^{1,2}

¹College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

²State Key Laboratory of Oil and Gas Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Email: 107018411@qq.com

Received: Dec. 28th, 2018; accepted: Jan. 10th, 2019; published: Jan. 17th, 2019

Abstract

The Jurassic Lianhuakou Formation calcareous conglomerate with a thickness of more than 1700 m is deposited in the Mianzhu area of northwestern Sichuan Basin, and the tectonic fracture is developed. It is a favorable place for groundwater migration and storage, and the groundwater contains high content of strontium (Sr) and has development value. However, the research on the causes of groundwater and the mechanism of Sr's richness in this area and even the whole northwest region is very weak. In this paper, the chemical composition data of 31 water samples in Mianzhu area and the dynamic changes of water quality, temperature and volume of Guanyin Spring were used to analyze the groundwater, surrounding rock composition and their interactions, and to study the causes of groundwater and the source of Sr. The content of Sr in the sample ranged from 0.25 to 0.96 mg/L. The dynamic change of water quality was between 0% - 12%, the water temperature was 17.9°C - 18.5°C, and the allowable extraction volume was 160 m³/d in dry season. It can be seen that the dissolution and leaching function of groundwater and surrounding rock calcareous conglomerates are strong, the water quality and water temperature are stable and the water is abundant, and the external influence is small, which is conducive to the formation and evolution of the Sr mineral water. In addition, combined with the structural and development history, the composition of the calcareous conglomerate is closely related to the marine carbonate rock in the Longmen Mountains in the northwest.

Keywords

Mianzhu Area, Groundwater, Strontium (Sr), Calcareous Conglomerate, Dissolution and Leaching Function, Marine Carbonate Rock

川西北地区绵竹观音泉富锶矿泉水来源分析

王一萱^{1,2}, 王多义^{1,2}, 左银辉^{1,2}

¹成都理工大学能源学院, 四川 成都

²成都理工大学, “油气藏地质与开发工程”国家重点实验室, 四川 成都

Email: 107018411@qq.com

收稿日期: 2018年12月28日; 录用日期: 2019年1月10日; 发布日期: 2019年1月17日

摘要

川西北绵竹地区沉积了厚度大于1700 m的侏罗系莲花口组钙质砾岩, 构造裂隙发育, 是地下水运移和储集的良好场所, 且地下水中锶含量很高, 具有开发价值。然而对本区乃至整个西北地区地下水成因及富锶机理的研究十分薄弱。本文利用绵竹地区31个水样化学成分数据及对观音泉水质、水温、水量动态变化数据对地下水、围岩成分以及二者相互作用进行分析, 研究地下水的成因以及锶的来源。样品锶含量范围在0.25~0.96 mg/L, 观音泉水质动态变化在0%~12%之间, 水温在17.9℃~18.5℃, 枯水期允许开采量160 m³/d。由此可知地下水与围岩钙质砾岩的溶蚀、溶滤作用强烈, 水质、水温稳定且水量丰富, 受外界影响小, 有利于锶矿泉水的形成和演化。此外, 结合构造发展史综合分析得出钙质砾岩的锶组分与西北龙门山区海相碳酸盐岩有密切关系。

关键词

绵竹地区, 地下水, 锶, 钙质砾岩, 溶滤作用, 海相碳酸盐岩

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下水资源与人的生活息息相关, 含有一定量的矿物质、微量元素且动态变化稳定的矿泉水是宝贵的矿产资源。对地下水的研究不仅有助于了解其对人的生活的影响, 还能查明地下水与周围环境的关系, 为日后更好的开发利用提供基础。锶(Sr)是对人体有益的微量元素, 前人在理论研究上得知它与钙极易产生类质同象而进入富钙矿物中, Sr 是海水的重要成分, 因此, 在海相碳酸盐岩中丰度最高, 其次是碎屑岩; 地下水中的是围岩溶滤过程中获得, 其含量取决于围岩中的 Sr 含量, 以 Sr²⁺形式与 Ca²⁺离子共同赋存在地下水中[1] [2] [3]。在应用上, Odum 发现流经不同地区水体中 Sr/Ca 值不同, 流经石灰岩地区河流水的 Sr/Ca 值低而 Sr²⁺、Ca²⁺浓度高, 流经潮湿地区河流水的 Sr/Ca 值低, 干旱地区河流水的 Sr/Ca 值高, 封闭盆地河流水的 Sr/Ca 值比补给河流水中的 Sr/Ca 值高[4]; Magnus Land, Johan Ingri 等利用 Ba/Sr、Ca/Sr 研究了瑞典北部 Kalix 河河水来源[5]; 在长春市东部火成岩中发现存在含有丰富偏硅酸和锶的孔隙裂隙水[6]; 鄂尔多斯盆地鄂托克旗矿泉水由于白垩系砂岩中锶元素含量较高, 在长时间的水岩作用下, 白垩系砂岩中的锶元素溶滤进去地下水[7]; 在和村 - 孙庄盆地的锶矿泉水主要赋存在溶蚀作用强烈的奥陶系灰岩中[8], 以上大多应用研究说明了地下水锶的直接来源是其围岩, 但并未追溯其根本来源, 即围岩中锶的来源。

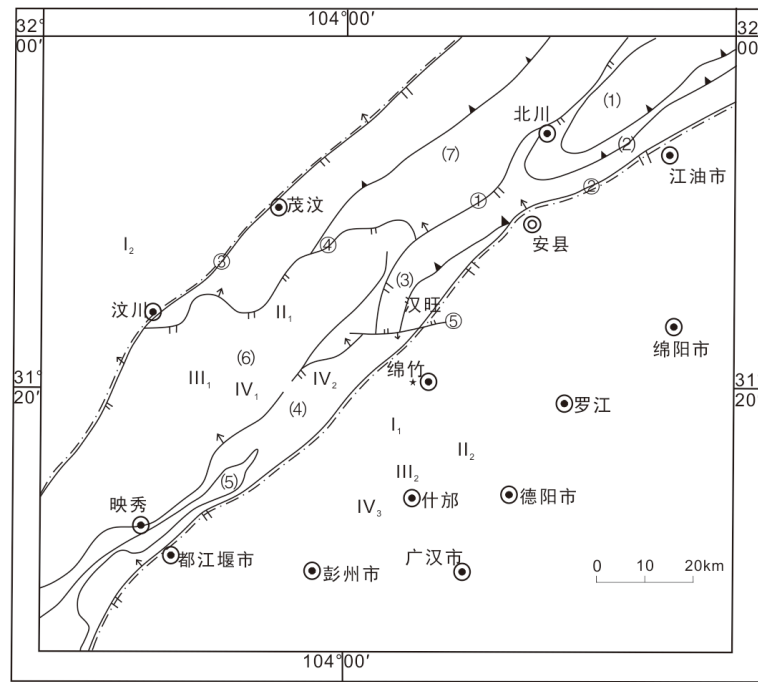
绵竹地区位于四川盆地西北区龙门山与成都平原接壤处, 本区有遵道玉妃洞、三溪寺莲花洞、

金花仙女洞等著名溶洞以及国家名泉玉妃泉含锶矿泉水，地下水活动性强，资源量大，而此前该区域的相关研究严重缺乏。研究发现，该区域地下水中富含锶、偏硅酸等多种有益微量元素，位于绵竹市区剑南春酒厂内的矿泉水锶高达 0.96 mg/L (锶矿泉水定名界限 0.20 mg/L)，偏硅酸 18.3 mg/L。本文通过水化学、抽水试验等，明确了地下水之间、地下水与围岩的相关性，结合该区域构造发展和沉积背景研究富锶地下水补径排特征及锶的来源，认为观音泉锶矿泉水中的锶来源于上侏罗统莲花口组钙质砾岩。本文在研究锶地下水来源时相对前人作出了一些改进，除了研究锶的直接来源，还探讨了锶的根本来源。绵竹地区锶矿泉水特征的研究对川西北地区的地下水活动及成因研究具有指示意义。

2. 区域地质概况

2.1. 构造背景

绵竹地区构造上属于扬子板块西缘龙门山前山冲断 - 推覆构造带，断层以前展式向盆地挤压，呈背驼式推覆构造，即越往盆地延伸，断层越新、质地越脆。本区位于江油灌县大断裂下盘，关口隐伏断层穿过中部山前地区，构造线方向以东北 - 南西为主(图 1)，加之强烈的逆冲推覆断层压力背景下，龙门山前山 - 山前带亦发育其他走向的小断裂，断层之间相互交错形成“X”剪切断层组合，为地下水的径流与汇集提供了有利通道与储集场所。



a 推覆体及飞来峰, b 井位, c 断裂及产状; ①映秀 - 北川断裂, ②灌县 - 江油断裂, ③茂汶断裂, ④九顶山断裂, ⑤龙形沟 - 汉旺断裂; (1) 唐王寨滑覆体, (2) 擂鼓推覆体, (3) 太平推覆体, (4) 金花推覆体, (5) 上书院 - 三河店推覆体, (6) 彭灌推覆体, (7) 九顶推覆体; II 扬子准台地, III 龙门山 - 大巴山台缘凹陷, III1 龙门山褶皱断束, IV1 九顶山台穹, IV2 雁门凹褶束, II2 四川台凹, III2 川西台陷, IV3 成都断凹, I2 松潘 - 甘孜地槽褶皱系

Figure 1. Geological structure map of Northwest Sichuan

图 1. 川西北地区地质构造纲要图

2.2. 岩性特征

本区主要地层有侏罗系莲花口组和第四系。莲花口组厚度大于 1700 m，倾向南东，主要岩性为巨厚层状、块状钙质砾岩夹含砾砂岩，砾石主要成分为灰岩、白云岩，胶结物成分为钙砂质、钙泥砂质。该组钙质含量高，易溶蚀，是溶洞、地下水发育的主要场所，前文所提的溶洞与矿泉水均出自于此岩层，也是地下水锶的主要来源。第四系为砂砾卵石、粘土为主的松散堆积物。

2.3. 观音泉井概况

观音泉矿泉水通过凿井抽水方式开采，井深 55.0 m。矿泉水为承压孔隙水，取自第四系中下更新统，深 22 m，层厚 25 m，可分为上、下两层。上层棕红色砂质粘土夹砾石含水、透水性差，为盖层；下层黄灰色砂砾卵石层透水性较好，含孔隙水，为储层。下伏地层莲花口组深 47 m，厚 8 m，紫红色中-厚层砂质泥岩，含水、透水性差，为底部隔水层。

3. 水化学及水文地质特征研究

3.1. 研究依据及方法

地下水的化学组成反映了其在储存运移过程中与岩石的相互作用，可以分析地下水、地层以及围岩的特征。通过野外实地勘查，并在绵竹地区 31 个水样点(包括观音泉凿水井)采集水样，按照“GB8537-2008《饮用天然矿泉水》国家标准饮用天然矿泉水检验方法”在实验室对样品进行检测。Sr 采用火焰发射光谱法，根据稀释后水样中 Sr 的质量浓度以及发射强度绘制校准曲线并按下列公式进行计算：

$$\rho(\text{Sr}) = \rho_1 * D$$

$\rho(\text{Sr})$ ——水样中的锶的浓度(mg/L)

ρ_1 ——校准曲线中 Sr 的浓度(mg/L)

D——水样稀释倍数；

检验结果的主要影响因素有以下三点：

1) 地表水流越流：绵竹地区地表水系发育，有绵远河、石亭江等多条河流，浅表地下水丰富，容易渗进地下水。

2) 地下水循环深度：地下水循环深度越大，水岩作用时间越长，越能达到均衡状态，矿物成分越稳定。

3) 围岩厚度：地下水的物质主要来自围岩，岩石厚度越大，径流相对越长，越有利于地下水获取围岩中的组分。

此外，还在丰、平、枯期对观音泉井水温、水质等参数进行一个水文年的动态观测并进行抽水试验，以获得降深与涌水量的参数，采用枯水期计算允许最大开采量。

3.2. 数据分析

检测结果各项指标均符合国家规定，从表 1 可知，矿泉水水质属 $\text{HCO}_3\text{SO}_4\text{-CaMg}$ 型，pH 值 7.21~7.72，溶解性总固体 696.0~740.0 mg/L，锶含量 0.88~0.96 mg/L，偏硅酸 16.3~18.9 mg/L，是弱碱性低钠富锶矿泉水；从表 2 可知区域水样锶含量范围在 0.25~0.96 mg/L；动态观测结果显示观音泉水质动态变化在 0%~12%之间，水温在 17.9℃~18.5℃；根据抽水试验水位计算出枯水期允许开采量 160 m³/d。

Table 1. Main components of Guanyinquan drinking natural mineral water well
表 1. 观音泉饮用天然矿泉水井主要组分含量表

项目	实测值(mg/L)及时间			含量平均值(mg/L)	含量波动区间(%)	
	平水期(2013.5)	丰水期(2013.9)	枯水期(2013.12)			
阳离子	K ⁺	1.34	1.34	1.35	1.34	0~0.7
	Na ⁺	9.26	7.84	7.67	8.26	7~12
	Ca ²⁺	122	112	120	118	3~5
	Mg ²⁺	39.6	37.3	41.1	39.33	4~5
阴离子	HCO ₃ ⁻	360	340	340	346.7	2~4
	CL ⁻	9.79	9.86	10.1	9.9	1~2
	SO ₄ ²⁻	164	153	156	157.7	3~4
	Sr ²⁺	0.95	0.88	0.96	0.93	2~3
H ₂ SiO ₃	18.9	16.3	18.3	17.8	6~8	
pH	7.21	7.72	7.60	7.51	3~4	
溶解性总固体	740	696	712	716	3	

Table 2. Groundwater sample Sr content (mg/L) test results
表 2. 地下水样品锶含量(mg/L)检测结果

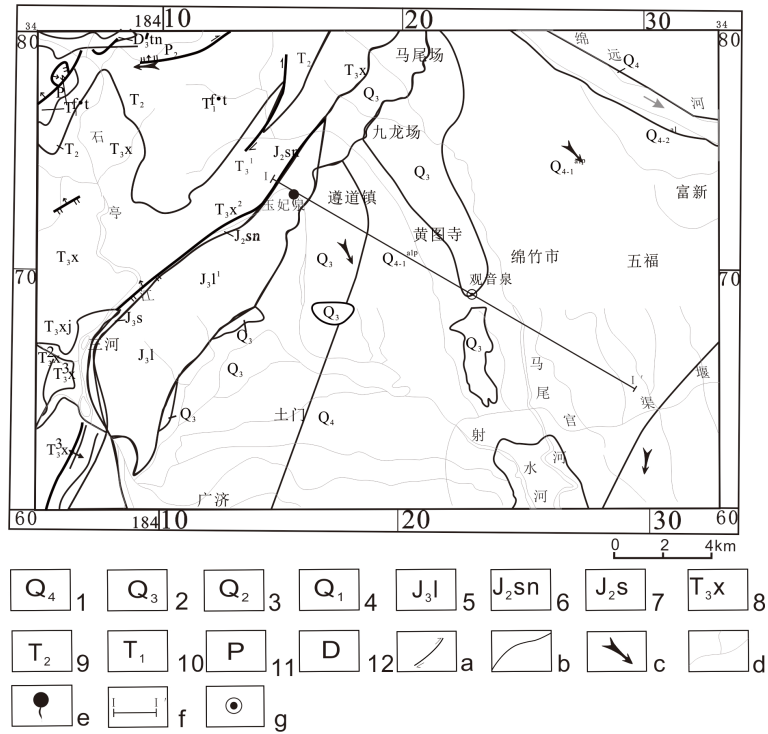
编号	1(观音泉)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ρ(Sr)	0.96	0.89	0.63	0.81	0.56	0.49	0.64	0.72	0.56	0.67	0.66	0.69	0.76	0.23	0.60	
编号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
ρ(Sr)	0.65	0.85	0.25	0.53	0.89	0.74	0.65	0.67	0.98	0.29	0.35	0.74	0.43	0.41	0.39	0.56

3.3. 地下水补径排特征

由上述数据可知,地下水水化学环境稳定、补给充足,溶滤、溶蚀作用强烈,水质稳定、水量丰富、受外界影响小。结合野外地层岩性、地势勘查,研究区地势由北西龙门山区向南东盆地区下降,莲花口组地层倾向南东,在北西龙门山地势较高处可见莲花口组露头(图 2),滴盐酸剧烈气泡,与前文莲花口组钙质砾岩岩性描述相符,可以得出:饱含 CO₂ 的大气降水在北西向高地垂直渗入,与围岩发生溶滤作用并呈层状由北西向南东缓慢径流(图 3、图 4),水力坡度约 1.3%,拉长了水岩作用时间,有利于矿泉水的形成演化,过程中部分通过断层或者直接渗入第四系形成承压孔隙水。地下水同层位间存在水力联系,因此在成分上相同;又因径流长度、地下水流向等,而在含量上呈现差异。

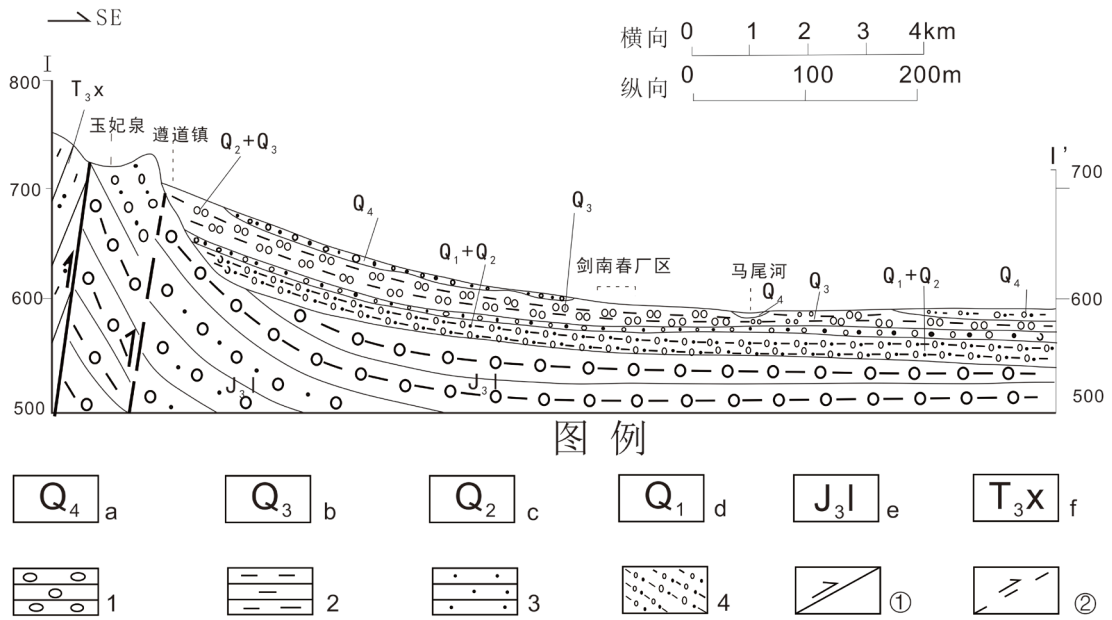


Figure 2. Calcareous conglomerate of the Lianmenkou Formation in the Front of Longmen Mountains
图 2. 龙门山山前莲花口组钙质砾岩



1 第四系全新统, 2 第四系上更新统, 3 第四系中更新统, 4 第四系下更新统, 5 侏罗系莲花口组, 6 侏罗系遂宁组, 7 侏罗系沙溪庙组, 8 三叠系上统须家河组, 9 三叠系中统, 10 三叠系下统, 11 二叠系, 12 泥盆系, a 平移断层, b 地地质界线, c 地下水流向, d 河流, e 下降泉, f 剖面位置, g 井口位置

Figure 3. Hydrogeological map of Mianzhu area
图 3. 绵竹地区水文地质图



a 第四系全新统, b 第四系上更新统, c 第四系中更新统, d 第四系下更新统, e 侏罗系莲花口组, f 三叠系上统须家河组; 1 砾岩, 2 泥岩, 3 砂岩, 4 砂泥卵石层; ①断层, ②隐伏断层

Figure 4. I-I' Sectional view
图 4. I-I'剖面图

4. 富锶矿水来源及成因探讨

4.1. 来源分析

通过对观音泉及邻近数千米内地下水水样点锶含量等值线分析显示(图 5), 锶在北西至南东, 分别向两侧递减, 与莲花口组向南西、北东逐渐变薄, 最终因逆冲断层作用——三叠系须家河组上升而被覆盖尖灭(图 3)有关。加之前文提到绵竹玉妃泉锶矿水直接利用了侏罗系上统莲花口组溶洞中的岩溶水, 说明砾岩中的岩溶水本身就是锶矿水, 可见地下水中的锶主要通过莲花口组的水岩作用直接获得。前人通过对莲花口组砂砾岩中的沉积构造指向的野外测量, 显示古水流绝大部分自北西流向南东, 与相关地层厚度、粒度变化吻合, 表明莲花口组物质来源于西北侧隆升的龙门山地区[9] [10], 其含锶组分来自龙门山区海相碳酸盐岩地层, 且位于本区附近上泥盆统沙窝子组下段海相灰岩中还发育有磷硫铝锶矿共生矿床。综上所述得出: 地下水与莲花口组发生交换作用直接获得 Sr^{2+} , 莲花口组含锶组分与龙门山区海相碳酸盐岩有关。

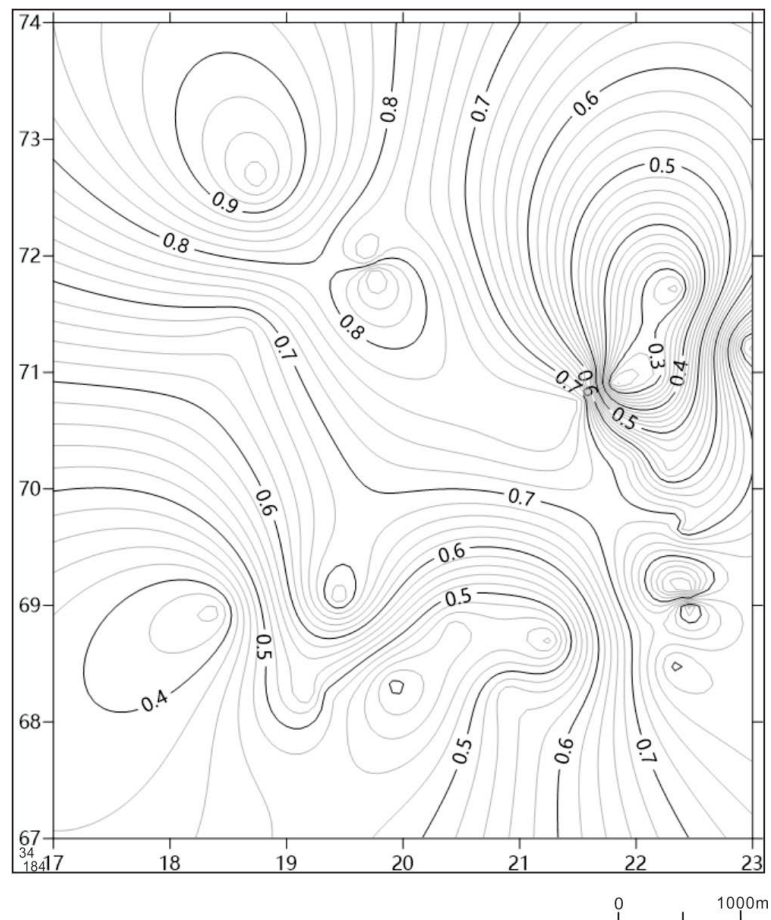


Figure 5. Contour Map of Sr content
图 5. 地下水锶等值线图

4.2. 构造成因

晚三叠系须家河组时期, 受印支运动早幕 - 中幕影响, 龙门山地区在松潘 - 甘孜特提斯造山带挤压隆起, 形成前展式逆冲推覆构造, 并由北西向南东递进发展, 形成川西前陆盆地。海水由北向南退出,

富锶海相碳酸盐岩出露遭受剥蚀, 川西前陆盆地接受沉积, 由海相三角洲相碳酸盐岩转变为海陆过渡相碎屑岩[11][12][13][14]。经过一段时间的宁静期后, 到印支期晚幕, 松潘-甘孜特提斯造山带形成全面褶皱, 龙门山地区剧烈变形, 整个川西北地区随之剧烈抬升广泛成陆, 结束了海相沉积史。须家河组遭受强烈剥蚀, 岩相发生转变, 川西前陆盆地进入陆相碎屑岩沉积阶段[15]。至侏罗纪早期末或中期初, 本区随着四川盆地的下降继续接受千佛岩组-莲花口组的陆相沉积, 在侏罗世晚期至白垩世早期, 燕山期龙门山快速强烈隆升, 包括上泥盆统沙窝子组在内的海相地层酸盐岩出露剥蚀, 形成一套巨厚钙质冲积扇砾岩, 本区位于冲积扇西南边缘, 母岩最初来自晚三叠世以前龙门山区的海相碳酸盐岩地层。

5. 结论

1) 通过水化学实验结果结合野外地质勘查, 揭示了地下水的成因, 确定了锶来源的途径。并由绵竹地区可推知整个川西北地区碎屑岩地下水富锶机理皆与此相似, 即地下水通过接受大气降水补给, 富钙碎屑岩中的锶通过溶滤作用进入地下水并随之径流, 最终形成富锶地下水。

2) 川西北地区富钙碎屑岩中的含锶组分最初来自龙门山区晚三叠世之前沉积的海相碳酸盐岩地层, 经印支期、燕山期反复剧烈的抬升剥蚀与沉积, 最终在龙门山山前形成巨厚的钙质砾岩。

3) 以上结论既可以为川西北地区龙门山江油-都江堰山前冲积扇的地下水来源提供些指示作用, 也可为锶在海相碳酸盐岩中丰度最高, 碎屑岩次之的成因提供一些依据。

参考文献

- [1] 刘庆宣, 王贵玲, 张发旺. 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, 2004, 31(6): 19-23.
- [2] 许佩瑶, 丁志农. 含锶饮用天然矿泉水的形成[J]. 勘察科学技术, 1997(5): 36-38.
- [3] 王增银, 刘娟, 王涛, 等. 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, 2003, 22(4): 91-95.
- [4] Odum, H.T. (1957) Strontium in Natural Waters. Texas University Institute of Marine Science Publications, 4: 22-37.
- [5] Land, M., Ingri, J., Andersson, P.S., et al. (2000) Ba/Sr, Ca/Sr and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ Ratios in Soil Water and Groundwater: Implications for Relative Contributions to Stream Water Discharge. *Applied Geochemistry*, 15, 311-325. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00054-2)
- [6] 孙岐发, 田辉, 郭晓东, 等. 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, 2017, 44(5): 1031-1032.
- [7] 李馨, 杜利伟. 鄂尔多斯盆地鄂托克旗矿泉水井含锶矿泉水成因分析[J]. 西部资源, 2015: 205-206.
- [8] 常明华. 和村-孙庄盆地富锶矿泉水赋存地质条件[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(2): 24-26.
- [9] 崔秉全, 龙学明, 李元林. 川西拗陷的沉降与龙门山的崛起[J]. 成都地质学院学报, 1991, 18(1): 39-45.
- [10] 王自剑. 龙门山北段晚侏罗世冲积扇沉积特征分析及意义[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [11] 刘树根, 杨荣军, 吴熙纯, 孙玮, 陈杨. 四川盆地西部晚三叠世海相碳酸盐岩-碎屑岩的转换过程[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(5): 556-565.
- [12] 邓康龄. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时序[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 485-490.
- [13] 杨长清, 刘树根, 曹波. 龙门山造山带与川西前陆盆地耦合关系及其对油气成藏的控制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(4): 471-476.
- [14] 刘和甫, 梁惠社. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 1994, 68(2): 101-117.
- [15] 陈杨, 赵霞飞, 刘树根, 刘春富. 四川盆地西部海相碎屑岩-陆相碎屑岩的转换过程[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 26(6): 607-705.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2330-1724，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojs@hanspub.org