

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.05.03

引用格式: 樊新庆, 尚亚军, 张淞. 重庆市温塘峡背斜地热资源特征[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 18–24. (Fan X Q, Shang Y J, Zhang S. Characteristics of geothermal resources in Wentang Gorge anticline of Chongqing[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(5): 18–24.)

重庆市温塘峡背斜地热资源特征

樊新庆, 尚亚军, 张 淞

(重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队, 重庆 400700)

摘要: 温塘峡背斜是华蓥山帚状穹褶束中的背斜之一, 地热水资源丰富, 地热显示主要表现为天然温泉和人工温泉 2 类。通过统计和分析背斜两翼地热钻井的水量、水质和含水层资料, 发现该构造主要热储含水层为嘉陵江组四段和二段, 次要热储含水层为嘉陵江组三段和一段。水化学类型以硫酸盐型为主, 但两翼有所不同, 镁钙离子当量浓度比小于 1, 说明地热水化学成分主要来源于灰岩含水层。水质和水量受地质构造作用控制。温塘峡背斜具备热储盖层、热储层和下部热储隔热隔水层的层状热储结构特征, 热储温度表现为西翼和东翼相当。物探测井数据显示, 1 700 ~ 2 000 m 深度处热储温度在 26.42 ~ 51.7 °C 之间, 且自北向南略有升高。研究成果可为温塘峡地热水资源进一步勘查开发提供参考和指导。

关键词: 温塘峡背斜; 地热水资源; 热储层; 重庆

中图分类号: P641; P314

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2021)05–0018–07

0 引言

重庆市华蓥山帚状穹褶束中的沥鼻峡、温塘峡、观音峡、铜锣峡等峡谷中均有温泉出露, 温泉资源十分丰富, 以“山山有热水, 峡峡有温泉”而著名。2012 年 10 月 26 日, 重庆被授予“世界温泉之都”的称号, 地热资源勘查和开发迅速升温。但重庆地区温泉的水量、水位、水温从历史上看呈下降趋势, 有的甚至已经断流^[1–2]。地热水是难以再生的矿产资源, 如果过度开发, 地热资源环境将会受到不可逆转的破坏。重庆市地热资源主要富集于华蓥山基底断裂以东、七曜山基底断裂以西的川东褶皱带内^[3]。重庆市温塘峡背斜是重庆众多背斜中温泉出露个数最多、资源最为丰富的背斜构造之一^[4]。前人主要通过选取局部典型天然温泉, 采用水文地球化学和同位素等方法, 分析了其水温地球化学特征, 对地热水中硫酸根等部分离子的形成机理、地热水补给高程、热储温度^[5–7]、地热水成因等进行了研究, 并取得了一定

的认识。为更全面地呈现温塘峡背斜地热地质特征, 本文收集了大量地热水资源勘查的深钻井资料, 并全面系统地对温塘峡地热水的地热地质、水文地球化学、热储层结构和温度等特征及地热水成因进行了总结和研究, 可为今后重庆温泉之都建设过程中温塘峡地热水资源勘查开发及深入研究提供参考和指导^[8]。

1 区域背景

温塘峡背斜是华蓥山帚状穹褶束(构造四级分区)中的背斜之一(图 1), 该背斜北端老岩头处与华蓥山相接, 往南跨过嘉陵江, 南延至江津区油溪镇再跨过长江而倾没。背斜长约 105 km。构造轴线总体延伸呈“S”形, 背斜轴部狭窄呈尖棱状, 两翼不对称^[2]。水天池以北, 东翼 60°~80°, 西翼 30°~40°; 梨树湾以南, 东翼 30°~50°, 西翼 60°~70°。温塘峡背斜由于受构造运动的影响, 背斜轴部局部发育有断层, 如中段轴部发育有青木关断层。

收稿日期: 2020–07–06; 修订日期: 2021–04–14。

基金项目: 重庆市国土资源和房屋管理局“重庆市北碚区澄江镇地热水资源勘查(编号: 2012–181)”项目资助。

第一作者简介: 樊新庆(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、区域地质、地热地质工作。Email: 284631799@qq.com。

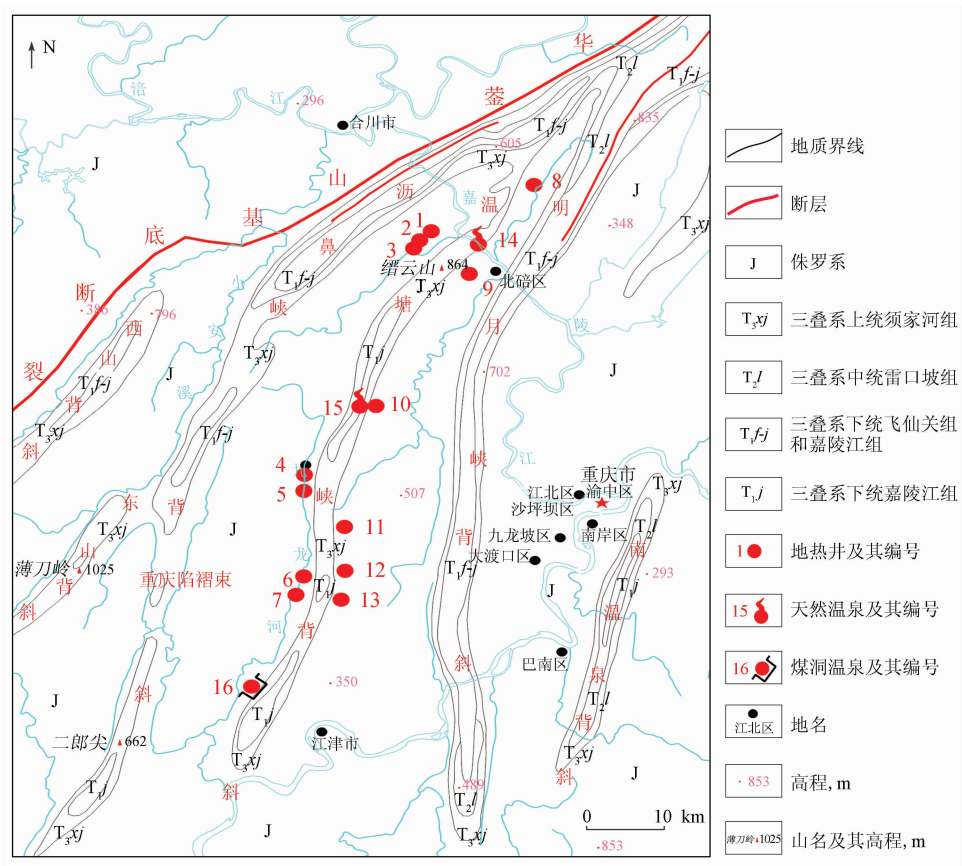


图1 温塘峡背斜地热显示点分布图

Fig.1 Distribution of geothermal display points in Wentang Gorge anticline

温塘峡背斜出露地层自背斜轴部向两翼有三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})、三叠系中统雷口坡组(T_{2l})、三叠系上统须家河组(T_{3xj})砂岩^[5],侏罗系下统珍珠冲组(J_{1z})和自流井组(J_{1zl})、侏罗系中统新田沟组(J_{2x})和沙溪庙组(J_{2s})、侏罗系上统遂宁组(J_{3sn}),以及厚度较小、呈零星分布的第四系(Q)松散堆积层。

地形地貌严格受地质构造和出露的地层岩性控制。在地质构造作用下,背斜总体呈低山地貌,背斜山轴部由于碳酸盐岩地层裸露,受溶蚀作用影响,形成一条自北向南展布的槽谷,背斜两翼须家河组砂岩形成2条山岭,呈现一山、一槽、二岭^[9]的地貌形态。背斜翼部侏罗系砂泥岩地层形成高丘、中丘、低丘、缓丘和平坝地貌。

2 地质特征

温塘峡背斜地热显示主要分天然温泉和人工温泉2类^[3]。构造作用致使沉积岩隆起形成背

斜,江河流对背斜山局部侵蚀,形成峡谷,峡谷在侵蚀作用下将雷口坡组和嘉陵江组等热储层揭露,深部热水向上溢出形成温泉,此类成因的温泉在温塘峡背斜有北碚区北温泉^[10-12]和沙坪坝区青木关温泉,主要分布于背斜北段。在开采三叠系须家河组中的煤炭资源时,井巷施工揭露地下热水形成温泉,即煤洞温泉,温塘峡背斜有江津长冲煤洞温泉,分布于背斜南段。还有一种类型是为发展温泉旅游业,在背斜翼部或轴部采用钻井揭露地下热水形成的温泉,在温塘峡背斜有13处地热水钻井。

温塘峡背斜两翼均存在地热水资源,主要集中在背斜中段和北段(图1)。对地热显示点的研究发现:温塘峡背斜有7个地热钻井、1个煤洞温泉和1个天然温泉以嘉陵江组四段为地热水含水层;有6个地热井和1个天然温泉以嘉陵江组二段为地热水含水层;有5个钻井以嘉陵江组三段为地热水含水层;有2个钻井和1个天然温泉以嘉陵江组一段为地热水含水层。以嘉陵江组四段为地热水含水层的地热井出水量为1 350.43~80 000 m³/d,出水

量大于 2 000 m³/d 的钻井比例占 78%；以嘉陵江组三段为地热水含水层的地热井出水量为 1 350.43 ~ 3 260.35 m³/d,出水量大于 2 000 m³/d 的钻井比例占 25%；以嘉陵江组二段为地热水含水层的地热井出水量为 921.00 ~ 6 007.82 m³/d,出水量大于 2 000 m³/d 的钻井比例占 43%；以嘉

陵江组一段为地热水含水层的地热井出水量为 921.00 ~ 1 947.0 m³/d,出水量大于 2 000 m³/d 的钻井比例为 0%。因此,温塘峡背斜主要热储含水层为嘉陵江组四段和二段,次要热储含水层为嘉陵江组三段和一段。温塘峡背斜温泉和地热钻井统计见表 1。

表 1 温塘峡背斜温泉和地热钻井统计

Tab.1 Statistics of hot springs and geothermal wells in Wentang Gorge anticline

构造部位	钻井编号	钻井深度/m	水温/℃	水量/(m ³ ·d ⁻¹)	地热水含水层
西翼	1	1 570.41	35.0	5 538.24	嘉陵江组四段
	2	1 557.00	37.0	4 000.00	嘉陵江组四段
	3	2 005.33	43.5 ~ 44.0	5 957.45 ~ 6 007.82	嘉陵江组二段和四段
	4	1 880.00	46.0	6 646.00 ~ 7 320.00	嘉陵江组四段
	5	2 329.35	40.0 ~ 41.0	3 091.10 ~ 3 260.35	嘉陵江组三段
	6	1 918.74	41.0	1 849.84 ~ 1 850.69	嘉陵江组二段、三段和四段
	7	1 852.99	43.5	1 350.43	嘉陵江组三段和四段
	16	煤洞温泉	25.0	80 000.00	嘉陵江组四段
东翼	8	1 770.49	48.0 ~ 48.5	1 605.00 ~ 1 813.00	嘉陵江组一段、二段和三段
	9	1 508.68	33.9 ~ 34.7	1 980.00 ~ 2 204.00	嘉陵江组四段
	10	556.30(浅井)	36.0 ~ 36.2	2 563.50 ~ 4 098.80	嘉陵江组二段
	11	1 730.00	46.0	2 279.00 ~ 2 353.00	嘉陵江组二段
	12	2 053.00	46.0	1 230.00 ~ 1 947.00	嘉陵江组一段
	13	1 838.80	48.0	1 487.00 ~ 1 551.00	嘉陵江组二段和三段
	14	天然温泉	25.0 ~ 37.0	>2 000.00	嘉陵江组四段
	15	天然温泉	29.0	921.00	嘉陵江组一段和二段

深钻井揭露地热水水温普遍较高,一般在 35 ~ 48.5 ℃ 之间。从部分水温偏低的地热水钻井来看,水温偏低与热储含水层受断层改造程度有关,由于热储层受到断层破坏,导致浅部一定量的冷水与深部热水在局部混合,致使水温在一定程度上有所降低,如:地热井 1 在断层作用下,须家河组一段和雷口坡组地层重复出现,钻井过程中出现钻井液流量增加,停泵后地下水自溢量为 200 m³/d;地热井 5 在钻进中遇到隐伏断层,须家河组及雷口坡组地层重复出现两次,并在钻探过程中出现钻井液漏失现象,物探测井显示断层重复段井温明显偏低,推测为浅层低温地下水进入井内所致;地热井 10 也在热储层中出现了断裂。但是此类地热水钻井水量较未钻遇断层的地热水钻井水量明显偏大。天然温泉和煤洞温泉较地热钻井温泉的温度更低,一般在 25 ~ 37 ℃ 之间。天然温泉出露位置均为深层地热水的天然排泄区,排泄区是区域上受到侵蚀和溶蚀最强烈的地区,浅层低温地下水与深部上升的地热水混合^[10],导致天然温泉水温低于钻井揭

露的地热水温度。

温塘峡背斜地热水的水化学具有以下特征(表 2):地热水溶解性总固体的含量为 1 086.4 ~ 3 352 mg/L,属于微咸水和咸水;pH 值多在 7.0 ~ 8.2 之间,属于弱碱性水;水温多在 40 ~ 48.5 ℃ 之间,均大于 34 ℃,达到了温水的矿水命名标准;水化学类型以硫酸盐型为主,且背斜西翼水质类型主要为 SO₄ - Ca 型,东翼水质类型主要为 SO₄ - Ca·Mg 型。地下水化学类型与热储含水层岩性具有一定的相关性,背斜西翼地热井主要以嘉陵江组一段和三段的灰岩为主要含水层,背斜东翼地热井主要以嘉陵江组二段和四段的白云岩为主要含水层。通过 Mg/Ca 离子当量浓度比例计算(表 3),Mg/Ca 离子当量浓度比均小于 1,说明温塘峡背斜地热水化学成分主要来源于灰岩含水层^[13]。偏硅酸和锶往往能达到理疗热矿水的水质标准,且多数温泉水中含硫化氢气体。地热水可用于理疗、洗浴、采暖、温室、养殖等领域。各钻井主要阴离子和阳离子枯水期和丰水期变化较小,水质动态较为稳定。

表 2 温塘峡背斜主要地热井水化学特征

Tab.2 Hydrochemical characteristics of main geothermal wells in Wentang Gorge anticline

热储构造部位	钻井编号	水期	pH 值	含量/(mg·L ⁻¹)									溶解性总固体	水质类型
				HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	偏硅酸	总 H ₂ S		
西翼	1	枯	7.72	213.23	1 371.45	11.40	4.90	457.94	91.96	8.320	28.52	0.140	2 097.00	SO ₄ - Ca·Mg
		丰	8.03	196.49	1 368.57	15.80	8.30	456.15	78.29	10.820	18.71	0.140	2 058.19	SO ₄ - Ca·Mg
	3	枯	7.48	182.40	1 523.33	15.15	7.50	491.03	118.17	10.900	26.25	0.036	2 320.00	SO ₄ - Ca
		丰	7.80	159.92	1 473.12	17.58	8.30	557.24	99.23	11.380	27.31	0.026	2 400.46	SO ₄ - Ca
	4	枯	7.88	164.51	1 828.60	18.90	7.88	599.29	122.13	8.900	38.52	1.400	2 760.00	SO ₄ - Ca
		丰	7.67	166.53	1 795.39	24.54	7.52	589.53	124.48	17.400	36.99	1.470	2 698.00	SO ₄ - Ca
	5	枯	7.12	216.45	1 195.97	14.56	4.23	439.66	61.65	11.765	33.29	1.500	1 916.00	SO ₄ - Ca
		丰	7.17	203.64	1 368.36	14.56	4.19	445.49	108.97	11.667	33.01	3.050	2 123.00	SO ₄ - Ca
	6	枯	7.64	201.57	1 672.95	78.80	7.95	567.22	115.61	14.440	29.07	37.060	2 746.36	SO ₄ - Ca
		丰	7.76	151.06	1 656.00	73.30	8.95	571.38	110.87	13.860	41.17	15.360	2 634.01	SO ₄ - Ca
	7	枯	7.05	215.60	2 061.74	96.70	19.55	682.08	141.96	14.982	30.81		3 352.00	SO ₄ - Ca
		丰	6.88	158.04	1 882.65	83.70	15.70	556.66	140.31	14.890	33.56		2 920.00	SO ₄ - Ca
东翼	8	枯	7.38	139.76	2 053.22	16.95	12.35	659.92	148.27	18.277	37.70	0.090	3 030.00	SO ₄ - Ca·Mg
		丰	7.45	145.55	1 881.99	15.65	12.74	651.00	136.63	15.134	36.17	0.070	2 840.00	SO ₄ - Ca·Mg
	9	枯	6.55	144.82	893.31	15.72	5.13	304.02	60.85	6.850	26.51		1 398.48	SO ₄ - Ca
		丰	6.51	144.28	892.63	15.14	5.04	303.53	60.24	6.240	26.21		1 396.47	SO ₄ - Ca
	10	枯	7.50	306.77	678.00	7.37	4.06	229.31	103.55	7.260	17.70		1 213.48	HCO ₃ ·SO ₄ - Ca·Mg
		丰	7.90	332.01	542.90	7.70	4.20	236.87	65.88	7.462	25.60		1 086.40	HCO ₃ ·SO ₄ - Ca·Mg
	11	枯	7.43	147.42	2 263.22	15.13	14.30	685.67	170.36	11.500	33.83	0.860	3 259.52	SO ₄ - Ca·Mg
		丰	7.47	144.67	2 225.04	12.82	11.82	674.67	167.35	12.570	34.27		3 202.88	SO ₄ - Ca·Mg
	12	枯	8.20	156.38	2 117.68	8.90	11.35	660.03	145.29	13.500	33.02	0.800	3 103.80	SO ₄ - Ca·Mg
		丰	6.90	171.56	2 118.82	8.34	10.29	673.46	159.87	10.640	34.48		3 192.24	SO ₄ - Ca·Mg
	13	枯	7.42	144.05	2 007.17	15.90	15.30	632.25	137.02	13.780	36.22		2 935.92	SO ₄ - Ca·Mg
		丰	7.70	205.42	1 870.72	10.30	10.45	638.38	138.85	12.680	38.12	0.058	2 920.92	SO ₄ - Ca·Mg
	14	枯	7.02	158.60	1 247.97	16.73	9.34	547.72	110.86	12.230			2 390.00	SO ₄ - Ca
		丰	6.89	164.70	1 264.03	11.82	6.98	530.92	111.71	12.200			2 280.00	SO ₄ - Ca
	15	枯	6.94	268.40	547.81	8.50	6.03	223.18	73.43	6.550			1 180.53	SO ₄ ·HCO ₃ - Ca·Mg
		丰	6.88	298.90	559.92	8.56	6.05	314.45	77.16	7.210				SO ₄ ·HCO ₃ - Ca·Mg

表 3 温塘峡背斜主要地热井 Mg/Ca 离子当量浓度比

Tab.3 Mg/Ca equivalent concentration ratio of main geothermal wells in Wentang Gorge anticline

热储构造部位	钻井编号	水期	Ca ²⁺ 含量/ (meq·L ⁻¹)	Mg ²⁺ 含量/ (meq·L ⁻¹)	当量浓度比	热储构造部位	钻井编号	水期	Ca ²⁺ 含量/ (meq·L ⁻¹)	Mg ²⁺ 含量/ (meq·L ⁻¹)	当量浓度比
西翼	3	枯	24.50	9.72	0.40	东翼	8	枯	32.93	12.20	0.37
		丰	27.81	8.16	0.29			丰	32.49	11.24	0.35
	5	枯	21.94	5.07	0.23		11	枯	34.22	14.02	0.41
		丰	22.23	8.97	0.40			丰	33.67	13.77	0.41
	7	枯	34.04	11.68	0.34		12	枯	32.94	145.29	0.36
		丰	27.78	11.54	0.42			丰	33.61	159.87	0.39
		枯					13	枯	31.55	137.02	0.36
		丰						丰	31.86	138.85	0.36

溶解性总固体的含量具有以地热井 10 为中心向南北方向逐步升高的特点,10 号钻井位于背斜轴部高点,是该背斜三叠系嘉陵江组灰岩的主要出露区域,说明地热水的补给区主要为温塘峡背斜灰岩裸露区,大气降水自灰岩裸露区补给后,向南北两个方向顺层径流,在被嘉陵江等切割后,含水层裸露的低洼区域以天然温泉(北温泉)的形式排泄。

3 热储结构特征

温塘峡背斜具有典型的层状热储结构特征,自上而下分别为热储盖层、热储层和下部热储隔热隔水层^[14](图 2)。因钻井开孔层位不同,揭露热储盖层、热储层等钻厚有所不同(表 4)。侏罗系中下统钻厚一般为 650~1 140 m,三叠系上统须家河组钻厚一般为 464~687 m,三叠系中统雷口

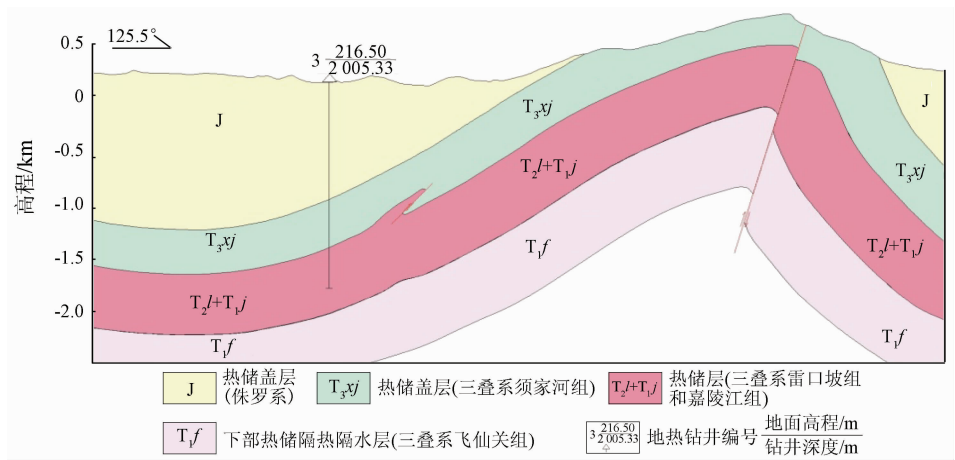


图 2 温塘峡背斜热储结构特征

Fig.2 Heat storage structure characteristics of Wentang Gorge anticline

表 4 温塘峡背斜主要地热水井热储结构特征
Tab.4 Heat storage structure characteristics of main geothermal wells in Wentang Gorge anticline

钻井编号	结构	钻井深度/m	地层 钻厚/m	地层岩性
3	盖层	0.00 ~ 1 140.00	1 140.00	侏罗系上沙溪组至珍珠冲组砂泥岩
		1 140.00 ~ 1 608.00	468.00	三叠系须家河组砂岩夹泥岩
	储层	1 608.00 ~ 1 634.00	26.00	三叠系雷口坡组灰岩、白云岩
		1 634.00 ~ 2 005.33	371.33	三叠系嘉陵江组四段至二段灰岩、白云岩、岩溶角砾岩
7	盖层	0.00 ~ 863.00	863.00	侏罗系下沙溪组至珍珠冲组砂泥岩
		863.00 ~ 1 327.00	464.00	三叠系须家河组砂岩夹泥岩
	储层	1 327.00 ~ 1 339.00	12.00	三叠系雷口坡组灰岩、白云岩
		1 339.00 ~ 1 852.99	513.99	三叠系嘉陵江组四段至部分一段灰岩、白云岩、岩溶角砾岩
8	盖层	0.00 ~ 650.00	650.00	侏罗系自流井中部至珍珠冲组砂泥岩
		650.00 ~ 1 337.00	687.00	三叠系须家河组砂岩夹泥岩
	储层	1 337.00 ~ 1 355.00	18.00	三叠系雷口坡组灰岩、白云岩
		1 355.00 ~ 1 770.49	415.49	三叠系嘉陵江组四段至部分三段灰岩、白云岩、岩溶角砾岩
13	盖层	0.00 ~ 666.00	666.00	侏罗系下沙溪组至珍珠冲组砂泥岩
		666.00 ~ 1 150.00	484.00	三叠系须家河组砂岩夹泥岩
	储层	1 150.00 ~ 1 200.00	50.00	三叠系雷口坡组灰岩、白云岩
		1 200.00 ~ 1 838.80	638.80	三叠系嘉陵江组四段至部分一段碳酸盐岩

坡组钻厚一般在 12 ~ 50 m 之间,三叠系下统嘉陵江组钻厚一般在 371.33 ~ 638.8m 之间。

侏罗系是陆相碎屑岩沉积,由 1 套巨厚的红色砂岩和泥岩互层地层构成。该层具有良好的隔热和隔水作用,为区域热储盖层。

三叠系须家河组由 3 套河流相(二、四、六段)和湖沼相(一、三、五段)交互出现组成,其中一、三、五段以泥岩为主夹煤层,二、四、六段以黄灰色砂岩为主。区域上具有良好的隔热作用,一、三、五段具有良好的隔水作用,为地热水的直接盖层。

三叠系雷口坡组以灰、灰黄色薄至中厚层状白云岩、泥质白云岩为主夹灰岩。区域上局部形成次要热储层。

三叠系嘉陵江组以海相碳酸盐岩为主,可分为 4 段:一段为灰色、浅灰色中厚层至厚层白云岩、灰质白云岩或泥质白云岩,夹灰色薄层至中层状微晶灰岩及灰色厚层至块状盐溶角砾岩;二段以浅灰至灰色中厚层状微晶灰岩为主,夹浅灰色白云岩、灰质白云岩或白云质灰岩;三段以浅灰色、灰白色白云岩、灰质白云岩为主,夹灰色中厚层至块状盐溶角砾岩及少量微晶灰岩;四段以灰色薄层和中厚层状微晶灰岩、微晶砂粒屑灰岩为主,夹生物屑灰岩。该地层在地热作用、构造作用、岩溶水文地质作用下成为区域地热水热储含水层。

热储层下部为三叠系飞仙关组隔热和隔水层,该层主要为紫红色泥岩和灰岩互层结构。

4 热储温度特征

由温塘峡以往实施地热钻井的物探测井资料

显示(表5):温塘峡背斜西翼井深1 800~2 000 m,地层温度为47.6~54℃,钻井井口水温为41~44℃;背斜东翼井深1 700~1 800 m,地层温度为46.43~51.7℃,钻井井口水温为46~48.5℃。从热储温度看其属于低温地热资源。

温塘峡背斜热储构造热储温度特征表现为西翼和东翼相当,1 700~2 000 m深度处热储温度为26.42~51.7℃,且自北向南略有升高。

表5 温塘峡背斜热储温度统计

Tab.5 Statistics of thermal storage temperatures of Wentang Gorge anticline

构造部位	钻井编号	水温/℃	物探测井温度/℃
西翼	3	43.5~44.0	47.60(1 997.68 m)
	6	41.0	54.00(1 823.98 m)
东翼	8	48.0~48.5	46.43(1 770.49 m)
	11	46.0	51.70(1 700.00 m)

注:物探测井温度值后面括弧内数据为测点深度。

5 结论

(1)温塘峡背斜地热显示主要表现为天然温泉和人工温泉2类。两翼均存在地热水资源,主要集中在背斜中段和北段。通过对温塘峡背斜地热显示点水量与热储含水层统计分析,温塘峡背斜主要热储含水层为嘉陵江组四段和二段,次要热储含水层为嘉陵江组三段和一段。

(2)深钻井揭露地热水水温普遍较高,天然温泉和煤洞温泉的温度较地热钻井温泉的温度更低。地热水水化学类型以硫酸盐型为主,但两翼有所不同,地热水水质和水量的差异是地层岩性与地质构造共同作用的结果。镁钙离子当量浓度比小于1,说明地热水化学成分主要来源于灰岩含水层。

(3)温塘峡背斜具有热储盖层、热储层和下部热储隔热隔水层的层状热储结构特征。侏罗系砂岩和泥岩互层地层形成区域热储盖层,三叠系须家河组砂岩和泥岩地层形成地热资源直接盖层,三叠系嘉陵江组形成区域地热资源储层和含水层,三叠系飞仙关组泥岩和灰岩互层地层形成区域隔热隔水层。

(4)热储温度表现为西翼和东翼相当,属低温地热资源,1 700~2 000 m深度处热储温度在26.42~51.7℃之间,且自北向南略有升高。

参考文献(References):

[1] 罗云菊,刘东燕,刘新荣.重庆打造“温泉之都”的可行性分析[J].重庆大学学报:自然科学版,2007,30(1):147-151.
Luo Y J, Liu D Y, Liu X R. Feasibility analysis of exploitation “City of Hot Spring” in Chongqing[J]. J Chongqing Univ: Nat Sci Ed, 2007, 30(1): 147-151.

[2] 程群,杨华林,曾敏.重庆市主城区岩溶地热水资源的形成与保护[J].中国岩溶,2015,34(3):217-227.
Cheng Q, Yang H L, Zeng M. The formation and protection of Karst geothermal water resources in the main urban area of Chongqing[J]. Carsolog Sin, 2015, 34(3): 217-227.

[3] 曾敏.重庆温泉分布及类型研究[J].地下水,2013,35(5):4-7.
Zeng M. Study on hot spring distribution and types in Chongqing[J]. Ground Water, 2013, 35(5): 4-7.

[4] 宋志,倪化勇,姜月华,等.成渝城市群主要地质资源禀赋与绿色产业发展[J].中国地质调查,2019,6(5):74-82.
Song Z, Ni H Y, Jiang Y H, et al. Geological resources endowment and green industry development of Chengdu - Chongqing Urban Agglomeration[J]. Geol Sur China, 2019, 6(5): 74-82.

[5] 杨雷,肖琼,沈立成.重庆市温塘峡背斜地下热水资源特征研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2011,34(5):86-91.
Yang L, Xiao Q, Shen L C. Characteristics of geothermal water resources in Wentang valley anticline in Chongqing[J]. J Nat Sci Hunan Norm Univ, 2011, 34(5): 86-91.

[6] 肖琼,杨雷,蒲俊兵,等.重庆温塘峡背斜地表水-地下水-浅层地热水中硫同位素的环境指示意义研究[J].地质学报,2016,90(8):1945-1954.
Xiao Q, Yang L, Pu J B, et al. The environmental significance of sulfur isotope in surface water - ground water - shallow thermal water in Wentang Gorge anticline, Chongqing, China[J]. Acta Geol Sin, 2016, 90(8): 1945-1954.

[7] 杨雷,肖琼,沈立成,等.不同地质背景地热系统水-岩作用下温泉水的地球化学特征:以重庆市温塘峡背斜温泉、滇东小江断裂带温泉为例[J].中国岩溶,2011,30(2):209-215.
Yang L, Xiao Q, Shen L C, et al. Hydrogeochemical features of hot spring under water - rock processes of different geologic conditions: A case in the Wentangxia hot spring of Chongqing and the hot spring at Xiaojiang fault zone of the East Yunnan[J]. Carsolog Sin, 2011, 30(2): 209-215.

[8] 王贵玲,张薇,蔺文静,等.全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展[J].中国地质调查,2018,5(2):1-7.
Wang G L, Zhang W, Lin W J, et al. Project progress of survey, evaluation and exploration demonstration of national geothermal resource[J]. Geol Sur China, 2018, 5(2): 1-7.

[9] 李东升,刘东升.重庆地热水资源热储构造与径流补给[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):372-376.
Li D S, Liu D S. Geothermal reservoir structure and runoff flow recharge of geothermal water resources in Chongqing City[J]. J Hohai University: Nat Sci, 2011, 39(4): 372-376.

[10] 肖琼,沈立成,杨雷,等.重庆北温泉地热水碳硫同位素特征

研究[J]. 水文地质工程地质,2013,40(4):127-133.

Xiao Q, Shen L C, Yang L, et al. Environmental significance of carbon and sulfur isotopes of the North hot spring in Chongqing[J]. Hydrogeol Eng Geol,2013,40(4):127-133.

[11] 拓明明,周训,郭娟,等. 重庆温泉及地下热水的分布及成因[J]. 水文地质工程地质,2018,45(1):165-172.

Tuo M M,Zhou X,Guo J,et al. Occurrence and formation of the hot springs and thermal groundwater in Chongqing[J]. Hydrogeol Eng Geol,2018,45(1):165-172.

[12] 肖琼,沈立成,杨雷. 地下热水的来源与补给机制分析:以重庆北温泉为例[J]. 重庆大学学报,2015,38(4):91-103.

Xiao Q,Shen L C,Yang L. Analysis on origin and recharge mechanism of geothermal water; A case study of Beiwenquan hot spring in Chongqing, China[J]. J Chongqing University,2015,38(4):91-103.

[13] 钱会,马致远. 水文地球化学[M]. 北京:地质出版社,2005:55.

Qian H, Ma Z Y. Hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House,2005:55.

[14] 张彦普. 重庆市东温泉地热水地质特征及成因模式探讨[J]. 地下水,2018,40(1):36-39,72.

Zhang Y P. Discussion about the geothermal geological characteristics and genetic model of Dongwenquan in Chongqing City[J]. Ground Water,2018,40(1):36-39,72.

Characteristics of geothermal resources in Wentang Gorge anticline of Chongqing

FAN Xinqing, SHANG Yajun, ZHANG Song

(No. 208 Geological Exploration Team, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Chongqing 400700, China)

Abstract: The Wentang Gorge anticline is one of the anticlines in the broom – shaped dome pleats of Huaying Mountain, with abundant geothermal water resources of natural hot springs and artificial hot springs. Through statistics and analysis of the water quantity, water quality and aquifers of geothermal drillings on both sides of the anticline, the authors have identified that its main thermal storage aquifers are Member 2 and Member 4 of Jialingjiang Formation, and its secondary thermal storage aquifers are Member 1 and Member 3 of Jialingjiang Formation. The main hydrochemical type is sulfate type, but the conditions in the two wings of the anticline are different. The equivalent concentration ratio of magnesium to calcium ions is less than 1, which indicates that the chemical composition of the geothermal water is mainly from limestone aquifer. The water quality and quantity were controlled by the geological structure. The Wentang Gorge anticline has the characteristic of layered structure which includes thermal reservoir cap rocks, thermal reservoir and lower thermal reservoir insulation and confining bed, and the thermal storage temperatures for the two wings of the anticline are similar. The thermal storage temperature is between 26.42 ℃ and 51.7 ℃ at 1 700 – 2 000 m depth according to the geophysical logging data, with an increasing trend from north to south. This research would provide some references and guide for further exploration and exploitation of thermal water resources in Wentang Gorge.

Keywords: Wentang Gorge anticline; geothermal water resources; thermal reservoir; Chongqing

(责任编辑: 刘丹)