

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.10.012

典型层状热储地热水富集特征研究 ——以观音峡背斜东翼为例

吕玉香^{1,2}, 谭林³, 张中举¹

(1.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; 2.西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;
3.重庆市地质调查院, 重庆 401122)

摘要: 观音峡背斜为典型的层状热储构造。利用背斜南东翼已成功实施的 11 口地热井资料, 采用对比研究、相关分析等方法, 揭示了层状热储地热水富集特征: 热储埋深越大, 岩溶发育程度越弱, 地热水越贫乏; 热储埋深越大, 热储盖层隔热保温效果越好, 地热水水温越高; 层状热储含水层厚度愈厚, 岩溶发育程度越强, 地热水越富集; 热储含水层厚度愈厚, 岩溶裂隙越发育, 地热水水温越低; “渐变型”层状热储地热水富集程度相对较好, 地热井平均出水量 2 136.75 m³/d; “急变型”层状热储地热水富集程度相对较差, 地热井平均出水量 584.93 m³/d。

关键词: 层状热储; 观音峡背斜; 热储埋深; 地热水富集

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)10-108-07

Study on the enrichment characteristics of the geothermal water in typical layered thermal reservoir —Taking the east flank of Guanyinxia anticline as an example

LYU Yuxiang^{1,2}, TAN Lin³, ZHANG Zhongju¹

(1. 208 Hydrogeological Team, Chongqing Geological Bureau of Geology
and Minerals Exploration, Chongqing 400700, P.R.China;

2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, P.R.China;

3. Chongqing Institute of Geological Survey, Chongqing 401122, P.R.China)

Abstract: The Guanyinxia anticline is a typical layered thermal reservoir, and 11 geothermal wells have been successfully implemented in its southeast flank. Using comparative study, correlation analysis and other methods to analyze the data of these wells, we research the enrichment characteristics of the geothermal water in typical layered thermal reservoir. The results show the larger the thermal reservoir buried depth is, the weaker the karst development and the poorer the geothermal water is. While, the larger the thermal reservoir buried depth is, the better the heat insulation performance of the thermal reservoir and the higher the temperature of hot water is. The thicker the layered thermal reservoir is, the stronger the karst development and the richer the geothermal water is. While, the thicker the thermal

收稿日期: 2017-05-07

基金项目: 重庆市国土局科研项目(KJ-2016015); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0502302)。

Supported by Scientific Research Program of Chongqing Geological Survey Institute(KJ-2016015) and the National Key Research and Development Program of China(2016YFC0502302).

作者简介: 吕玉香(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文地质科研与生产工作, (E-mail)ivyx02@163.com。

reservoir and the stronger the karst fissure's development is, the lower the temperature of hot water is. The layered thermal reservoir with gradually changed occurrence is relatively rich, and the average water yield of the geothermal wells is $2\ 136.75\ \text{m}^3/\text{d}$, while the layered thermal reservoir with rapidly changed occurrence is relatively poor, and the average water yield of the geothermal wells is $584.93\ \text{m}^3/\text{d}$.

Keywords: layered thermal reservoir; the Guanyinxia anticline; the depth of thermal reservoir; the enrichment characteristics of geothermal water

中国地热资源丰富,且分布广泛,类型齐全,黄尚瑶等^[1]将中国地热资源分为岩浆型、断裂隆起型、沉积盆地型 3 种类型,其对应的热储结构为带状热储和层状热储。

沉积盆地型热储结构即为层状热储,是指热流体赋存于一定层位,呈层状流出,由热储层位、热储盖层、热储下部隔水岩层 3 部分组成^[2],其地热水温度一般为中低温,主要分布在华北平原、汾渭盆地、松辽平原、淮河盆地、苏北盆地、江汉盆地、四川盆地、银川平原、河套平原、准噶尔盆地等地区。相关单位在这些地区开展过大量勘探、开发工作,部分学者开展过鲁北拗陷区地热资源开发利用关键性问题研究^[3],中低温地热田层状热储地热资源储量计算方法探讨^[4],深部岩溶热储埋藏分布及岩溶发育特征等研究^[5],系统论述层状热储地热水富集特征的研究较少。

重庆市作为“世界温泉之都”,地热资源勘查、开发历史悠久,近年来,相关学者也开展了一系列研究工作。罗云菊等^[6]论述了重庆主城区地下热水水文地质条件、温泉动态变化、储水量及补给条件等;吕玉香等^[7]、张宇等^[8]对重庆市地热水资源勘查研究进展进行了论述;Yang 等^[9]基于重庆市主城区 36 口碳酸盐岩地热井的物理化学数据,系统分析了地热水中主要化学成分的来源,估算了深部地热水的初始温度、循环深度及其补给高程,刻画了地热水的水循环概念模型;肖琼等^[10-11]以北温泉为例,分析了重庆地热水的来源与补给机制;漆继红等^[12]分析了铜锣峡背斜和南温泉背斜的水力联系;杨华林等^[13]进行了重庆主城区地热资源可再生性评价。

笔者以重庆市观音峡背斜东翼地热田为研究对象,在收集整理并综合分析已有资料的基础上,系统地研究了层状热储富集特征及影响因素,为层状热储地热资源科学、合理的勘探开发及利用提供了科学依据。

1 研究区概况

观音峡背斜构造处于上扬子准地台四川盆地东部川东高陡褶皱带东缘,重庆弧形褶皱范围内,属新华夏系构造为主的构造区域。观音峡背斜呈北北东~近南北向展布,长 103 km。北端与华蓥山背斜东翼相连,南端延伸至长江猫儿峡以南倾没。背斜宽 3~7 km(轴部宽度约 1.75 km)左右。背斜岩层倾角东缓西陡,东翼一般 $23^\circ\sim 55^\circ$,向南逐渐增大(山碛一带)可达 $70^\circ\sim 80^\circ$;西翼岩层倾角一般 $70^\circ\sim 80^\circ$,乃至直立。

背斜核部主要为三叠下统飞仙关组(T_1f)、嘉陵江组(T_{1j})、中统雷口坡组(T_2l)碳酸盐岩地层,其中三叠下统嘉陵江组(T_{1j})厚 600 m 左右,以灰岩为主,间夹白云质灰岩、白云岩、角砾状灰岩(深部为膏岩层),为本区主要热储层位;三叠系中统雷口坡组(T_2l)在区内保存的厚度极小,一般在 30 m 左右,为区内次要热储层。翼部由三叠系上统须家河组(T_3xj)及侏罗系(J)碎屑岩地层组成,其中须家河组为一套灰色长石英砂岩夹灰黑色炭质页岩及煤层,厚 450 m 左右,为嘉陵江组热储的第 1 隔热保温盖层。侏罗系地层为一套内陆河湖相沉积、以紫红色泥岩为主夹砂岩的沉积岩,厚度一般大于 2 000 m,为嘉陵江组热储的第 2 隔热保温盖层,三叠系下统飞仙关组(T_1f)为一套泥质岩层夹灰岩层,厚 500 m 左右,为嘉陵江组热储下部的隔水岩层(图 1)。

区内地热水以大气降水为补给源,补给高程为 800~1 200 m,补给区在华蓥山北端的岩溶露头区^[14]。大气降水通过表层裂隙和溶孔、溶隙及洼地、槽谷中的落水洞、溶蚀漏斗、暗河入口等入渗地下所形成,并由高向低分别作纵向、横向运移(径流),除部分于沟谷、槽谷或洼地边缘以下降泉或暗河形式就近排泄外,尚有部分通过溶蚀管网继续向深部入渗,并在热储层中缓慢循环运移和储集(图 2)。

2000 年以来,为开发重庆市地热资源,于该背斜东翼先后成功施工了 11 口地热井(表 1),钻井深度在 650~2 388 m,水量介于 508~6 023 m^3/d ,水温介于 $32\sim 63.5\ ^\circ\text{C}$,水质类型多为硫酸钙型或硫酸钙镁型,且均达到了热矿水命名标准。由此表明观音峡背斜东翼的地热水资源十分丰富,具有较大的开发利用前景。

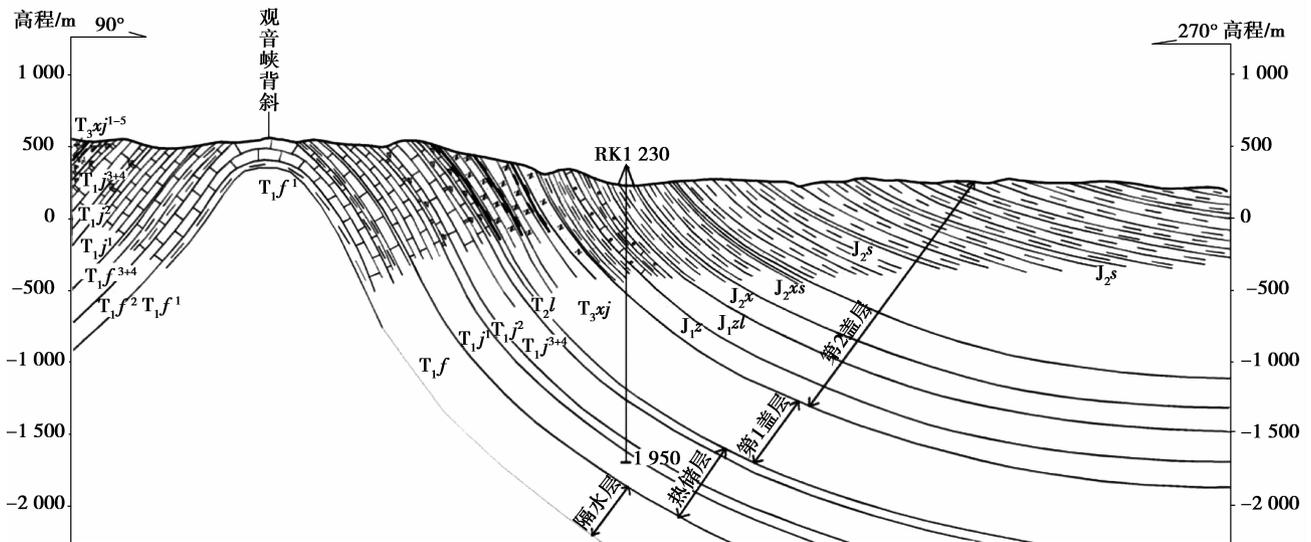


图 1 观音峡背斜东翼层状热储构造示意图

Fig.1 Schematic diagram of layered thermal reservoir structure in the east flank of Guanyinxia anticline

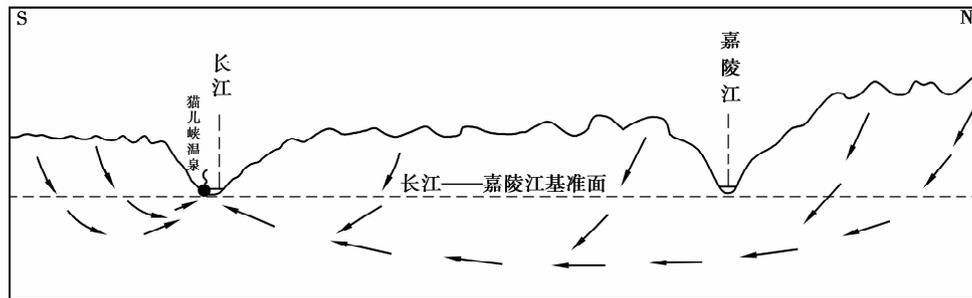


图 2 观音峡背斜地热水补径排示意图

Fig. 2 Schematic diagram of geothermal water recharge-flow-discharge in Guanyinxia anticline

表 1 观音峡背斜东翼近期施工地热井一览表

Table 1 List of geothermal wells in the east flank in Guanyin anticline

地热井位置	井口标高/m	开孔层位	终孔层位	井深/m	流量/ ($m^3 \cdot d^{-1}$)	水温/ $^{\circ}C$
北碚静观 ZK3	425.0	J_2x	T_1j^1	2 376.74	2 189.00	59.0
北碚区静观镇 ZK1	325.8	J_2s^2	T_1j^1	2 296.68	737.00	63.5
北碚区静观镇 ZK1-1	350.0	J_2s^2	T_1j^1	2 388.00	508.03	63.0
北碚区施家梁镇狮子坝颐尚	225.0	J_1zl^3	T_1j^1	1 300.00	1 827.36	44.0
北碚区童家溪镇水天花园	237.0	J_2s^2	T_1j^2	2 065.72	509.76	49.0
北碚区童家溪镇赵家湾中安翡翠	213.5	J_2s^2	T_1j^3	1 910.00	2 484.00	57.0
沙坪坝区歌乐山镇步云山庄	402.0	T_3xj	T_1j^4	650.00	546.57	32.0
沙坪坝区谭家岗镇梨树湾	250.0	J_2s^1	T_1j^1	1 718.00	6 023.81	54.0
九龙坡区中部九龙园区华岩	285.0	J_2x	T_1j^1	1 866.00	1 249.20	50.0
大渡口区跳灯镇千子岩(小南海)	195.0	J_2x	T_1j^1	2 336.00	1 244.80	57.0
江津区珞璜镇珞璜	190.0	J_2x	T_1j^1	2 539.00	1 529.28	62.0

2 层状热储地热水富集特征

地热水作为一种深层岩溶水,因其含水介质的不均一性,其运移及富集规律一直是水文地质学者研究的热点和难点^[15]。热储层厚度、埋深、岩溶发育程度、地形地貌、区域构造及其组合均可在不同程度上影响地热水的富集。笔者拟以地热水水量、水温、水压表征地热水富集程度,从热储埋深及厚度、含水层参数、热储倾角变化等方面着手,定量分析地热水富集特征的影响因素。

对观音峡背斜东翼地热井热储层、含水层参数与水压、水温、流量进行了统计分析(表 2):热储埋深区域变化较大,介于 1 308.0~1 980.8 m,纵向上北部由于受到隐伏断层的影响,埋深相对较深,南部相对较浅;横向上自轴部到翼部越来越深,在向斜轴部附近达到最深。热储含水层数 3~7 层,总厚 44~161 m。

对热储层顶板埋深、底板埋深、热储厚度、含水层数、含水层厚度、地热水水量、水温、水压等参数进行了相关分析(表 3)。

表 2 观音峡背斜东翼热储层、含水层参数与水压、水温、流量一览表

Table 2 List of thermal reservoir, aquifer parameters, water pressure, water temperature and flow in the east flank of Guanyinxia anticline

井位/名称	热储埋深及厚度/m			含水层/m		水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	井口 水压/MPa	水温/℃
	顶板	底板	厚度	层数	总厚			
静观 ZK3	1 840.0	2 376.74	536.74	3	116	2 189.00	0.620	59.0
静观 ZK1	1 980.8	2 296.80	316.00	7	64	737.00	1.330	63.5
静观 ZK1-1	1 968.0	2 388.00	420.00	3	44	508.03	0.470	63.0
施家梁颐尚	782.0	1 300.00	518.00	3	106	1 827.36	0.720	44.0
水天花园	1 624.0	2 066.00	442.00	3	118	509.76	-0.160	49.0
中安翡翠	1 765.1	1 910.20	145.00	3	68	2 484.00	2.800	57.0
梨树湾	1 308.0	1 718.00	410.00	4	161	6 023.81	2.270	54.0
华岩	1 414.0	1 753.00	452.00	3	69	1 249.20	0.580	50.0
千子岩	1 775.0	2 336.00	552.00	3	74	1 244.80	-0.035	57.0
珞璜	1 776.0	2 539.00	763.00	3	45	1 529.28	-0.166	62.0

表 3 观音峡背斜东翼热储层、含水层参数与水压、水温、流量相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of thermal reservoir, aquifer parameter and water pressure, water temperature and flow in the east flank of Guanyinxia anticline

	顶板埋深	底板埋深	热储厚度	含水层数	含水层厚度	水量	水温	水压
顶板埋深	1.000							
底板埋深	0.906	1.000						
热储厚度	-0.121	0.300	1.000					
含水层数	0.266	0.126	-0.328	1.000				
含水层厚度	-0.512	-0.494	-0.068	-0.036	1.000			
水量	-0.376	-0.393	-0.125	-0.010	0.696	1.000		
水温	0.877	0.852	0.004	0.385	-0.524	-0.144	1.000	
水压	-0.320	-0.427	-0.380	-0.212	0.405	-0.030	-0.525	1.000

2.1 热储埋深对地热水富集的影响

热储埋藏深度与热储盖层意义相当,热储埋深越深,意味着热储层上部的盖层越厚,经与地热水水量、水温、水压等参数进行了相关分析,得出如下结论:

第一,地热水水温与热储埋深呈正相关。热储顶板埋深、底板埋深与地热水水温相关系数分别为 0.877, 0.852(表 3),呈现严格的正相关,即热储埋深越深,地热水水温越高。热储层上部为厚厚的热盖层,热储盖层为热储层上部隔水、隔热保温层,其作用是防止热储层中热能的散失,形成隔水顶板。热储盖层是形成层状热储地热水形成的必要条件,热储盖层越厚,对热储层的隔热保温作用也越强。

第二,地热水水量与热储埋深呈负相关。热储顶板埋深、底板埋深与地热水水量相关系数分别为 -0.376 , -0.393 (表 3),呈负相关,但相关性不强。推测认为热储层埋深越深,溶蚀裂隙发育越弱,其储水能力越差,地热水水量越小,但热储埋深是否是地热水水量大小的决定性因素,还需开展进一步研究工作。

第三,地热水水压与热储埋深呈负相关。热储顶板埋深、底板埋深与地热水水压相关系数分别为 -0.320 , -0.427 (表 3),呈负相关,但相关性不强。理论上热储埋深越深,地热水压力应越大,其相关性应为正相关,但本次计算结果为负相关,说明,层状热储的地热水压力受多个因素的控制,如热储盖层的厚度、盖层的富水性以及热储层的岩溶发育程度等等,需通过钻孔成像、改变钻探工艺、取芯钻进等多种手段开展进一步研究。

2.2 热储岩溶发育程度对地热水富集的影响

由于重庆地区地热井一般采用牙轮钻头全面钻进,无法通过岩粉录井直接观察热储层中的溶蚀现象,通常是依据施工记录和简易水文地质观测资料,并结合物探测井成果综合判定其可能的含水区段(含水层),热储含水层能在一定程度上显示岩溶发育程度及其空间分布状况,因此,将含水层视为岩溶相对比较发育的区段。现将含水层层数、含水层厚度与热储埋深、地热水水量、水温、水压进行相关分析(表 3),得出如下结论:

1) 含水层厚度与热储埋深呈负相关,相关系数为 -0.512 ,表明研究区内热储层的岩溶发育程度明显具有随热储层埋深的增加而逐渐减弱的趋势。

2) 含水层厚度与地热水水量呈正相关,相关系数达 0.696,表明含水层愈厚,岩溶发育程度越强,储水能力越好,地热水也越富集。

3) 含水层厚度与地热水水温呈负相关,相关系数为 -0.524 ,表明含水层愈厚,岩溶发育程度越强,裂隙越发育,与上部岩溶水连通性越强,地热水水温越低。

4) 含水层厚度与地热水水压呈正相关,相关系数为 0.405,表明含水层厚度对地热水的压力也有一定的影响。

2.3 热储倾角变化控制地热水富集程度

热储层在地下产状的变化,严格受上覆地层产状的控制,并客观反应出在构造变动过程中的受力状况。地层倾角由陡变缓的转折过程易于产生张性裂隙,尤其是热储层属坚硬的碳酸盐岩,产生裂隙数量会进一步增多,从而促进地热水的富集。若在此类构造转折部位定孔,地热水出水效果可能较为理想。

观音峡背斜自北向南、自轴部到翼部出露地层倾角变化较大。嘉陵江组地层倾角 $25^{\circ}\sim 85^{\circ}$,平均 61° ;翼部须家河组地层倾角 $37^{\circ}\sim 70^{\circ}$,平均 58° ;翼部侏罗系珍珠冲组至沙溪庙组逐渐变缓,地层倾角 $18^{\circ}\sim 64^{\circ}$,平均 48° (表 4)。

据地热井勘查勘探资料,背斜东翼热储倾角亦由浅入深、自轴部到翼部逐渐变缓(表 4),埋深 500 m 处地层倾角 $36^{\circ}\sim 67^{\circ}$,平均 58° ;埋深 1 000 m 处地层倾角 $26^{\circ}\sim 63^{\circ}$,平均 51° ;埋深 1 500 m 处地层倾角 $17^{\circ}\sim 67^{\circ}$,平均 44° ;埋深 2 000 m 处地层倾角 $5^{\circ}\sim 44^{\circ}$,平均 28° 。由于其变化过程不同,其储水条件亦有差异,现分叙如下。

急变型:热储层产状由陡急剧变缓,其转折部位构造裂隙相对比较发育,但转折部位相对较窄,其是否利于地热水富集尚待验证。已有钻孔勘探部位均在该类转折部位下部,其岩层产状相对平缓,裂隙不甚发育,溶蚀作用微弱,溶蚀空间小,地热水的深部循环运移条件相对较差。静观 ZK1, ZK1-1 井和水天花园 3 口地热井即属于此类,热储层底板埋深 1 500~2 000 m,地层倾角变化分别为 37° , 35° , 35° ,地热井富水性相对较差,出水量分别为 737, 508.03, 509.76 m^3/d ,平均 584.93 m^3/d (表 4)。

渐变型:热储层产状由陡逐渐变缓,横向上展示宽缓,层面裂隙相对比较发育,溶蚀作用比较均匀,储存

空间较大,利于地热水及深部循环运移与储集。统计的 11 口地热井中有 8 口属于此类(占 72.7%),各地热井出水段整体均处于构造转折部位(即倾角变化部位),热储倾角变化为 $1^{\circ}\sim 20^{\circ}$,除步云山庄未揭穿主要热储层外,其余 7 口井的富水性相对较好,流量为 $546.57\sim 6\,023.81\text{ m}^3/\text{d}$,平均 $2\,136.75\text{ m}^3/\text{d}$ (表 4)。

表 4 观音峡背斜东翼钻孔热储倾角变化与流量对比表

Table 4 Comparison of borehole thermal reserves dip variation and flow in the east flank of Guanyinxia anticline

井位/名称	出露地层倾角/ $^{\circ}$			热储层底板埋深/m 及倾角/ $^{\circ}$				热储层倾角 变化/ $^{\circ}$		流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)
	热储层 (T_{1j})	盖层 (T_{3xj})	开孔 层(J)	500	1 000	1 500	2 000	差值	类型	
静观 ZK3	82	70	62	67	62	55	35	20	渐变型	2 189.00
静观 ZK1	84	70	61	65	58	67	30	37	急变型	737.00
静观 ZK1-1	77	70	56	67	62	60	25	35	急变型	508.03
施家梁颐尚	40	45	30	36	26	17	—	9	渐变型	1 827.36
水天花园	60	50	18	60	48	40	5	35	急变型	509.76
中安翡翠	45	37	40	50	52	33	26	7	渐变型	2 484.00
步云山庄	85	59	59	43	—	—	—	—	渐变型	546.57
梨树湾	62	55	38	60	40	25	20	5	渐变型	6 023.81
华岩	78	64	64	65	55	45	44	1	渐变型	1 249.20
千子岩	25	60	55	65	63	58	40	18	渐变型	1 244.80
珞璜	48	70	62	65	55	45	37	8	渐变型	1 529.28

3 结 论

1) 观音峡背斜位于上扬子准地台四川盆地东部川东高陡褶皱带东缘,是典型的层状热储构造,其东翼已成功实施 11 口地热井,水量介于 $508\sim 6\,023\text{ m}^3/\text{d}$,水温 $32\sim 63.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,富水条件较好。

2) 层状热储埋深对地热水水温、水量及水压均有一定影响,其中热储埋深越大,地热水水温越高,其相关系数达 0.877;热储埋深越深,溶蚀裂隙发育越弱,其储水能力越差,地热水水量越小;相关分析显示地热水水压与热储埋深呈负相关,尚待进一步研究验证。

3) 受目前地热水勘查、研究手段的限制,无法直接观察热储层中的溶蚀现象,以含水层厚度表征热储层岩溶发育程度,层状热储含水层厚度与热储埋深呈负相关,表明研究区内热储层的岩溶发育程度明显具有随热储层埋深的增加而逐渐减弱的趋势。层状热储含水层厚度愈厚,岩溶发育程度越强,储水能力越好,地热水也越富集,其相关系数为 0.696;含水层愈厚,岩溶裂隙越发育,与上部岩溶水连通性越强,地热水水温越低。

4) 层状热储构造转折部位,裂隙发育,利于地热水富集。热储层在地下产状的变化程度,对地热水富集程度也有较大影响,其中“渐变型”层状热储地热水富集程度相对较好,热储倾角变化 $35^{\circ}\sim 37^{\circ}$,地热井平均出水量 $2\,136.75\text{ m}^3/\text{d}$;“急变型”层状热储地热水富集程度相对较差,热储倾角变化 $1^{\circ}\sim 20^{\circ}$,地热井平均出水量 $584.93\text{ m}^3/\text{d}$ 。

参考文献:

- [1] 黄尚瑶,王钧.中国西部地热资源分布特征及其开发利用前景[C]//中国能源研究会地热专业委员会.中国西部地热资源开发战略研究论文集,北京:科学出版社,2001,3-13.
HUANG Shangyao, WANG Jun. Distribution characteristics of geothermal resources and their prospects for exploitation and utilization in western China[C]// Geothermal Council of China Energy Research Society. A collection of papers on

- geothermal resources development strategy in Western China, Beijing: Science Press, 2001: 3-13. (in Chinese)
- [2] 曾敏. 重庆温泉分布与成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
ZENG Min. Distribution and genesis of Chongqing hot spring[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 吴立进, 赵季初, 李艾银, 等. 鲁北拗陷区地热资源开发利用关键性问题研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(2): 300-306.
WU Lijin, ZHAO Jichu, LI Aiyin, et al. Key issues of geothermal resource exploration and utilization in the depression area of northern Shandong province[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(2): 300-306. (in Chinese)
- [4] 史忠民, 程秀明, 李传磊, 等. 山东省西北部中低温地热田层状热储地热资源储量计算方法探讨[J]. 山东国土资源, 2005, 21(9): 71-73.
SHI Zhongmin, CHENG Xiuming, LI Chuanlei, et al. Method study on measuring geothermal resource occurred in cellar type reservoir in low-medium geothermal fields in northwest Shandong province[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2005, 21(9): 71-73. (in Chinese)
- [5] 杨询昌, 周世海, 王成明. 山东省深部岩溶热储埋藏分布及岩溶发育特征[J]. 山东国土资源, 2013, 29(4): 8-11.
YANG Xunchang, ZHOU Shihai, WANG Chengming. Distribution of deep karst thermal reservoir and karst development characteristics in Shandong Province[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2013, 29(4): 8-11. (in Chinese)
- [6] 罗云菊, 刘东燕, 刘新荣, 等. 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, 1(30): 147-151.
LUO Yunju, LIU Dongyan, LIU Xinrong, et al. Feasibility analysis of exploitation “City of Hot Spring” in Chongqing[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 1(30): 147-151. (in Chinese)
- [7] 吕玉香, 胡伟, 杜春兰, 等. 重庆市地热水资源勘查研究进展述略[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 10: 1544-1547.
LYU Yuxiang, HU Wei, DU Chunlan, et al. Review on the progress of geothermal water exploration research in Chongqing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 10: 1544-1547. (in Chinese)
- [8] 张宇, 杨平恒, 王建力, 等. 重庆温泉研究进展[J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 468-474.
ZHANG Yu, YANG Pingheng, WANG Jianli, et al. Reviewed research on the hot springs in Chongqing[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(5): 468-474. (in Chinese)
- [9] Yang P H, Cheng Q, Xie S Y, et al. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 549: 50-61.
- [10] 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 Qiong, SHEN Licheng, YANG Lei. Analysis on origin and recharge mechanism of geothermal water: A case study of Beiqiwenquan hot spring in Chongqing, China[J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(4): 91-103. (in Chinese)
- [11] 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, 44(4): 127-133.
XIAO Qiong, SHEN Licheng, YANG Lei, et al. Environmental significance of carbon and sulfur isotopes of the North hot spring in Chongqing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 44(4): 127-133. (in Chinese)
- [12] 漆继红, 许模, 杨华云, 等. 川东铜锣山背斜—南温泉背斜温泉水力联系分析[J]. 人民长江, 2011, 42(11): 5-10.
QI Jihong, XU Mo, YANG Huayun, et al. Analysis on hydraulic connection of hot springs of Tongluo mountain anticline to South hot spring anticline in eastern Sichuan Province[J]. Yangtze River, 2011, 42(11): 5-10. (in Chinese)
- [13] 杨华林, 李明伦, 周神波, 等. 重庆市主城岩溶区地热资源可再生性评价[J]. 中国岩溶, 2013, 33(2): 167-175.
YANG Hualin, LI Minglun, ZHOU Shenbo, et al. Renewable assessment for geothermal resources in the karst area of Chongqing City[J]. Carsologica Sinica, 2013, 33(2): 167-175. (in Chinese)
- [14] 罗云菊, 刘东燕, 许模. 重庆地下热水径流特征研究[J]. 地球与环境, 2006, 34(1): 49-53.
LUO Yunju, LIU Dongyan, XU Mo. Study on the geothermal water runoff in Chongqing [J]. Earth and Environment, 2006, 34(1): 49-53. (in Chinese)
- [15] 吕玉香, 胡伟, 周军. 渝东南渝东北岩溶区地下水富集特征研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 83-86.
LYU Yuxiang, HU Wei, ZHOU Jun. Study on the enrichment characteristics of groundwater in Chongqing southeast and northeast karst areas[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Sciences), 2016, 35(4): 83-86. (in Chinese)