# 济南西北部碳酸盐岩热储浅埋区热异常机理研究

胡彩萍1),王楠2),宋亮1),白新飞1),王涛1),梁云汉1),孙晓涛1),彭文泉1)

1) 山东省第一地质矿产勘查院,济南,250100;

2) 山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队),济南,250014

内容提要:为了探寻济南岩体北部碳酸盐岩热储浅埋地热异常区形成机理,利用地质钻探编录、抽水试验、测温、水质分析测试等手段,对碳酸盐岩浅埋地热异常区地质特征、热储物性特征、地温场特征、水化学特征等进行研究,结果表明:碳酸盐岩浅埋区热储层发育在奥陶纪灰岩地层中,热储层岩溶裂隙发育,热储埋深 150~1000m,地 热异常区盖层地温梯度为 7.2~11.5℃/100m,水化学类型为 SO4-Ca 型,TDS 为 1.3~1.5g/L,地热水中含有对人体有益的微量元素,地热水来源为大气降水,地热水中 50 年以前人渗的"古水"占主导;明确了热源除正常的地温 传导之外,济南岩体阻挡迫使水流深循环加热后上涌,断裂沟通深部热源等也是地热异常区形成的重要因素。

关键词:地热;地热异常区;碳酸盐岩;地热形成机理

地热资源是一种清洁的可再生能源,被广泛地 应用于发电、供暖、洗浴、医疗等诸多领域(Li Zhenhan et al., 2013; Luo Lu et al., 2015), 随着人 民生活对环境质量要求的不断提升,清洁的地热资 源开发利用重视程度不断提高。近年来随着山东省 新旧动能转化工作的不断推进,进一步加快了对黄 河以北地热资源勘查开发的进度,开发利用的热储 层主要为碳酸盐岩热储。碳酸盐岩热储一般存在水 量大、热储层增温幅度小的特点,热储温度主要取决 于盖层厚度(Ma Rui, 2007;Guo et al., 2012);济南 西北部地热田为碳酸盐岩热储浅埋区,通过分析发 现,花朱断裂与桑西断裂之间热储盖层埋藏深度不 足 400m,水温高于 35℃,地温梯度较高,研究认为, 该碳酸盐岩浅埋区热储增温热源除构造沟通深部热 源外,济南岩体的阻挡促进了热水的深循环,是热储 温度普遍较高的原因,通过揭示深部热水循环和热 量来源,为该区地热勘查开发提供依据。

1 地质背景

济南西北部碳酸盐岩浅埋区位于济南岩体以 北,焦斌屯以南,以袁辛断裂为中心的碳酸盐岩埋藏 深度小于1000m的区域。

区域上地层主要发育有古生代寒武系、奥陶系、 石炭系、二叠系,新生代古近系、新近系和第四系(李 常锁等,2005)。寒武纪地层中富含三叶虫等浅海相 动物化石,岩性主要发育有灰岩、白云岩、紫红色泥 页岩等;奥陶纪地层以灰岩和白云岩互层为主,发育 有灰岩、白云岩、白云质灰岩、灰质白云岩等,局部含 有燧石结核。石炭纪地层以杂色、暗色泥岩为主,夹 煤层和灰岩;二叠纪地层以砂岩、泥岩互层为主,夹 煤层。新近纪地层岩性以泥岩、砂岩、含砾砂岩为 主,成岩性较差;第四纪地层岩性以黏土、砂、粉砂为 主,底部一般发育砾石层。

碳酸盐岩浅埋区及其周边构造断裂发育,断裂 主要发育北东向和北西向两组,北东向断裂有焦斌 屯断裂、西王断裂、棉张断裂,这些多呈阶梯状正断 层倾向北西,倾角较陡(60°~75°),断距和断裂落差 均不大。北西向断裂有花朱断裂、郝庄断裂、桑西断 裂和异常区中部的袁辛断裂,多倾向西南(图1),断 距一般小于100m,断裂落差一般小于200m,受区域 应力影响,将部分北东向断裂错断。

碳酸盐岩浅埋区南部岩浆活动强烈,形成了著

作者简介:胡彩萍,女,1976年生。研究员,主要从事水工环地质工作。Email: caipinghu126@126. com。

引用本文:胡彩萍,王楠,宋亮,白新飞,王涛,梁云汉,孙晓涛,彭文泉. 2019. 济南西北部碳酸盐岩热储浅埋区热异常机理研究. 地质学报,93(s1):178~183,doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019225.
Hu Caiping, Wang Nan, Song Liang, Bai Xinfei, Wang Tao, Liang Yunhan, Sun Xiaotao, Peng Wenquan. 2019. Thermal anomaly mechanism of carbonate rock thermal storage in the shallow buried areas of northwestern Jinan. Acta Geologica Sinica,93(s1):178~183.

收稿日期:2019-07-23;改回日期:2019-08-28;责任编辑:周健。



图 1 济南西北部碳酸盐岩浅埋区地质略图

Fig. 1 Geological sketch of shallow buried area of carbonate rock in northwestern Jinan

1一侏罗系;2一三叠系;3一二叠系;4一石炭系;5一奥陶系;6一中生代侵入岩;

7一地质界线及代号;8一断层及名称;9一岩浆岩体界线;10一地热井名称

1—Jurassic; 2—Triassic; 3—Permian; 4—Carboniferous; 5—Ordovician; 6—Mesozoic intrusive rocks; 7—geological boundary and code; 8—fault and name; 9—magmatic rock boundary; 10—geothermal well name

名的济南岩体。济南岩体在平面上呈近东西向的椭圆状,东西长约 29km,南北最宽 16.5km,面积约 268km<sup>2</sup>。济南岩体属中生代印支期济南超单元,为基性岩-中性岩,岩性主要为灰黑色中粒含橄榄苏长辉长岩、灰绿色中细粒辉长岩,及少量灰白色中粒辉石二长岩等,主要侵入奥陶纪地层中。

2 地热地质特征

#### 2.1 热储层特征

由于济南岩体的侵入,碳酸盐岩热储埋藏较浅,

受袁辛断裂的控制,形成浅埋热异常区。在济南岩体边缘地带热储层顶板埋深 246.55m(齐热 3 井),逐渐向西北倾斜,至齐热 1 井附近埋深 1306m。热储层岩性以奥陶纪灰岩为主,上部裂隙岩溶发育,以齐热 5 井为例,奥陶系顶板埋深为 340m,钻孔未揭穿奥陶系。在 360~470m、600~800m 段岩溶裂隙发育,岩性以青灰色灰岩、云斑灰岩、灰白色泥质灰岩为主,孔隙度一般在 4%~7%,根据抽水试验,出水量 40~120m<sup>3</sup>/h,热储层渗透系数 0.612~0.745m/d,导水系数 640.16~676.29m<sup>2</sup>/d。

#### 2.2 地温场特征

地温反映地球内热能的变化程度,地温的变化 是地质构造条件和地质历史的综合反映。碳酸盐岩 浅埋区增温带起始深度为 20m,深度 14~20m 为恒 温带,恒温层厚 6m;0~14m 深度为地温变动带,厚 度 14m;增温带起始地温 13.0~14.0℃,高于当地 多年平均气温 0.4~1.4℃,推测由地下热水上涌 引起。

根据盖层地温梯度变化特征,能够大致判断热 源和热异常范围,据地热井揭露热储盖层厚度数据, 结合测井资料获取热储盖层地温梯度,结果显示:桑 梓店一带热储盖层地温梯度为4.32℃/100m,齐河 袁辛断裂一带热储盖层地温梯度为 2.72~ 11.15℃/100m,槐荫区陈家庄一带热储盖层地温梯 度为 2.32~2.71℃/100m(表 1)。从总体上看,济 南岩体北部边缘盖层地温梯度最大,往北逐渐减小。 地温梯度与奥灰热储层埋深关系密切,即奥灰热储 埋藏较浅的齐河与天桥区交界处(袁辛断裂南端), 地温梯度最大(齐热4井),奥灰热储埋藏较深并远 离济南岩体的地区(齐热2井)盖层地温梯度较低, 说明齐热4井靠近深部地热上涌通道;该地热异常 区分布在袁辛断裂南侧靠近济南岩体附近(图 2), 地热水来源可能由深部地热水沿济南岩体北侧袁辛 断裂影响带上涌。

表 1 济南西北部碳酸盐岩热储浅埋异常区地热井统计表

Table 1 Geothermal well statistics of carbonate rock thermal storage shallow buried anomaly in northwestern Jinan

井号	井深 (m)	热储层埋深 (m)	热储层顶界 温度(℃)	增温带起始 埋深(m)	增温带起始 温度(℃)	出口温度 (℃)	水化学类型	TDS (g/L)	地温梯度 (℃/100m)
齐热1	1601.57	1306.00	53.6	20	13.5	57.0	SO <sub>4</sub> -Ca	3.54	3.12
齐热 2	1734.19	1444.00	52.2	20	13.5	55.5	SO <sub>4</sub> -Ca	3.28	2.72
<b>齐热</b> 3	653.41	246.55	31.4	20	13.5	36.0	SO <sub>4</sub> -Ca	1.13	7.90
齐热 4	643.06	194.00	32.9	20	13.5	38.0	SO <sub>4</sub> -Ca	1.46	11.15
齐热 5	805.50	320.00	37.7	20	13.5	43.0	SO <sub>4</sub> -Ca	1.43	8.06
齐热 6	1200.75	410.00	28.3	20	13.5	34.0			3.79
桑热1	760.00	419.10	30.7	20	13.5	33.0	SO <sub>4</sub> -Ca	2.39	4.31
槐热1	680.00	230	19.2	20	13.5	25.5	SO <sub>4</sub> • HCO <sub>3</sub> -Ca • Mg	0.49	2.71
槐热 2	707.68					25.2	SO <sub>4</sub> • HCO <sub>3</sub> -Ca • Mg		
槐热 5	1701.00	580	26.5	20	13.5	34.5	SO <sub>4</sub> • HCO <sub>3</sub> -Ca • Mg	0.50	2.32

# 3 地热水化学特征

### 3.1 水化学类型

地热水化学类型和 TDS 能够较直观地反应地 热水的径流和循环特征(Jiang Xiaowei,2011;Jiang Xiaowei et al.,2013)。一般来讲,降水经浅循环后 形成的地热水往往阴离子中含有较高的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 阳离子中 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>含量较大,TDS 值较低,多为淡 水;随着循环深度的增加,阴离子中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>逐渐减 少,直至消失,阳离子中 Ca<sup>2+</sup>离子含量也会有所降 低(Chen Gang,1998;He Qiufang et al.,2009;Cai Wutian et al.,2013;Liang Xing et al.,2015),TDS 值逐渐增大。

岩溶水中一般含有较高的  $Ca^{2+} Mg^{2+}$  阳离子, 阴离子则以  $HCO_3^- SO_4^{2-}$  为主,尤其是浅层岩溶 水, $HCO_3^-$ 含量一般较高(Wan Liqin,2008; Liang Yongping et al.,2010),随着循环深度的增加,  $HCO_3^-$ 含量逐渐减少,据各地热井水质分析结果显 示(表 1),碳酸盐岩浅埋热异常区(齐热 3、齐热 4、 齐热 5)及北部(齐热 1、齐热 2)地热水化学类型为 SO<sub>4</sub>-Ca型,而距该区西南 6km 的槐荫区岩溶水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量较高,说明浅埋热异常区地热水径流和 循环深度远大于槐荫地区。

另外 TDS 值高与地热水温度高值对应,地热水 经深循环后,温度不断升高,溶解的矿物质也不断增 加,说明 TDS 值与温度具有一定相关性(表1)。

### 3.2 微量元素

地热水中一般含有多种对人体有益的微量元素 (Gao Zongjun et al.,2014),地热水中偏硅酸含量 21.45mg/L,接近医疗矿水浓度,偏硼酸含量 2.50mg/L,锶含量12.00mg/L,锂含量2.25mg/L, 溴含量0.74mg/L,偏硼酸、锶含量达到医疗热矿水 浓度,锂含量达到矿水浓度,具有较好的疗养价值。

## 3.3 气体成分

奥陶纪地层岩性以灰岩和白云岩为主,热储层 地热水中气成分除游离 CO<sub>2</sub> 外,不易形成其他不良 或有害气体,据分析测试数据显示,奥灰热水中游离 CO<sub>2</sub> 含量为 12.38mg/L,未检测出其他不良气体。



图 2 济南西北部盖层地温梯度等值线图 Fig. 2 Geothermal gradient contour map of cover layer in northwestern Jinan

#### 3.4 同位素

通常利用同位素来确定地热水来源和形成时 间,利用同位素  $\delta$ D和  $\delta^{18}$ O与大气降水曲线对比可 以看出,地热水分布于  $\delta$ D- $\delta^{18}$ O关系曲线的两侧,且 靠近大气降水曲线,说明其水源来自大气降水(图 3)。另外,同位素 T值可以大致反映出地热水形成 与现今的时间,50年以前形成的"古水"中同位素 T 值一般小于 5T.U,新入渗地下水中同位素 T值一 般大于 40T.U,奥灰地热水中同位素 T值为 7.35 ±2.19 T.U,范围在 5~40T.U,且靠近 5T.U表明 地热水为新近水入渗与"古水"的混合水,且"古水" 占优势,新入渗水的补给较少。

# 4 地热异常机理分析

碳酸盐岩浅埋地热异常区盖层地温梯度大于 7℃/100m,出水口温度均在35℃以上,地温梯度值 远高于周边2~3℃/100m,水化学类型为SO4-Ca 型,TDS为1.3~1.5g/L,而南部槐热1井TDS为 0.49g/L,水化学类型为SO4 • HCO3-Ca•Mg型, 均说明异常区地热水比槐热1地热水径流深度大 的多。

水源:通过同位素分析地热水来源于大气降水,



图 3 济南西北部地热水中 dD-d<sup>18</sup> O 关系曲线图 Fig. 3 dD-d<sup>18</sup> O plot of geothermal water in northwestern Jinan

深循环后形成现今的地热水资源。 热源:济南岩体对碳酸盐岩浅埋地热异常区的

形成具有重要作用;首先,受岩体阻挡迫使岩溶水向 地下深处循环(Wang Qinbing et al.,2009;Xu Junxiang et al.,2012;Wang Jiale,2016),使水温不 断升高,为高温地热水的形成创造了深循环环境,济 南岩体阻挡了浅部冷水的径流,为异常区形成独立 的保温环境提供了条件(图 4)。其次,岩浆侵入对 周边岩体产生热压环境,使围岩变质并产生大量裂 隙,岩浆岩冷凝,也促使围岩裂隙的形成,为后期溶 蚀和地热水径流、储存提供了通道和空间。再次,岩 体阻挡迫使岩溶水深循环,溶解大量微量元素外,岩 体本身也带来大量微量元素,提升了地热水的利用 价值。

断裂活动沟通深部热源,使断裂附近产生大量 裂隙,为岩溶裂隙水深循环加热和径流提供了通道, 与济南岩体综合影响,岩体附近断裂影响带宽度最 大,也促进了深部热水沿岩体附近岩溶裂隙上涌,上 涌过程中受盖层阻隔封存形成地热异常区。

# 5 结论

碳酸盐岩浅埋地热异常区位于济南岩体北侧, 袁辛断裂南端,盖层地温梯度较高,最高达 11.15℃/100m,向外逐渐降低,异常中心地热井出 水口温度为36~42℃,矿化度大于1.2g/L且含有 丰富的微量元素,可作为医疗洗浴用水和供暖。

该异常区的形成受济南岩体控制作用明显,济 南岩体阻挡南部水源使其向更深处循环,岩浆岩活 动及冷凝给地热水存储创造了条件。断裂构造沟通 深部热源为异常区增温的同时,其影响带易于形成



图 4 济南西北部碳酸盐岩浅埋区地热水形成示意图

Fig. 4 Schematic diagram of geothermal water formation in

shallow buried areas of carbonate rocks in northwestern Jinan

1-第四系;2-新近系;3-侏罗系;4-三叠系;5-二叠系;6-石炭系;7-奥陶系;8-寒武系;9-泰山岩群;

10一中生代侵入岩;11一大气降水;12一地下水流;13一大地热流;14一地热井

1-Quaternary; 2-Neogene; 3-Jurassic; 4-Triassic; 5-Permian; 6-Carboniferous; 7-Ordovician; 8-Cambrian; 9-Taishan Rock and Rock

Group;10—Mesozoic intrusive rocks;11—atmospheric precipitation;12—groundwater flow;13—geothermal flow;14—geothermal well

溶蚀空间,为地热水径流和储层提供了通道和场所。 碳酸盐岩之上覆盖的一定厚度的保温盖层,为异常 区的形成创造了条件。

#### 注 释

◆常锁,张中祥,李岚,等. 2005. 济南北部地热田地热资源勘查 评价报告. 山东省地矿工程勘察院.

#### References

- Cai Wutian, Gao Zongjun, Wang Qingbing, He Qingchang, He Dianbin. 2013. Research on Connections between Jinan Karst Waters. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Chen Gang. 1998. The systematic analysis of time-varying characteristics of karst water system. Carsologica Sinica, (04): 49~54 (in Chinese with English abstract).
- Gao Zongjun, Xu Junxiang, Wang Shichen, Li Changsuo, Han Ke, Li Jiajia, Luo Fei, Ma Hekuan. 2014. The distribution characteristics and hydrogeological significance of trace elements in karst water, Jinan, China. Earth Science Frontiers, (04): 135~146 (in Chinese with English abstract).
- Guo Q, Wang Y. 2012. Geochemistry of hot springs in the Tengchong hydrothermal areas, southwestern China. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 215~216(0): 61~73.
- He Qiufang, Yang Pingheng, Yuan Wenhao, et al. 2009. Using chemical and microbiological indicators to track the recharge of underground rivers in a karst valley. Hydrogeology Engineering Geology, (03): 33~38 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Xiaowei. 2011. A study on aquifer systems and groundwater flow systems in drainage basins. PhD thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Jiang Xiaowei, Wan Li, Wang Xusheng. 2013. Advances in the Theory of Regional Groundwater Flow. Beijing, Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

- Li Zhenhan, Kang Fengxin, Liu Aiguo, et al. 2013. Jinan Geothermal Hot Spring. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Liang Xing, Zhang Renquan, Jin Menggui. 2015. Groundwater Flow System: Theoretical Application Survey. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Liang Yongping, Wang Weitai. 2010. The division and characteristics of karst water systems in northern China. Acta Geoscientica Sinica, (06): 860~868 (in Chinese with English abstract).
- Luo Lu, Pang Zhonghe, Yang Fengtian. 2015. Genesis analysis of sulfate thermal mineral water in carbonate aquifers at Jianhu uplift, Subei basin. Earth Science Frontiers, 22(02): 263~270 (in Chinese with English abstract).
- Ma Rui. 2007. Water-rock interaction and genesis of low-medium temperature thermal groundwater in carbonate reservoir. PhD thesis of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wan Liqin. 2008. Tracer study of karst groundwater in Jinan spring area. PhD thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiale. 2016. Analysis and identification of hierarchical groundwater flow system in Jinan. PhD thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Qinbing, Duan Xiuming, Gao Zandong, Fred Kloosterman, Zhou Yangxiao, Li Wenpeng. 2009. Groundwater flow modelling in Jinan karst spring area. Hydrogeology Engineering Geology, (05): 53~60 (in Chinese with English abstract).
- Xu Junxiang, Xing Liting, Wei Lufeng, et al. 2012. Jinan karst water system research. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese with English abstract).

#### 参考文献

蔡五田,高宗军,王庆兵,贺庆昌,贺殿彬. 2013. 济南岩溶水系统 水力联系研究. 北京:地质出版社.

- 陈刚. 1998. 岩溶水系统时变特性的系统分析. 中国岩溶, (04): 49 ~54.
- 高宗军,徐军祥,王世臣,李常锁,韩克,李佳佳,罗斐,马河宽. 2014. 济南岩溶水微量元素分布特征及其水文地质意义. 地学前缘, (04):135~146.
- 贺秋芳,杨平恒,袁文昊,等. 2009. 微生物与化学示踪岩溶地下水 补给源和途径.水文地质工程地质,(03):33~38.
- 蒋小伟. 2011. 盆地含水系统与地下水流动系统特征. 中国地质大 学(北京)博士学位论文.
- 蒋小伟,万力,王旭升. 2013. 区域地下水流理论进展. 北京:地质出版社.
- 李振函,康凤新,刘国爱,等. 2013. 济南地热温泉.北京:地质出版社.
- 梁杏,张人权,靳孟贵. 2015. 地下水流系统:理论应用调查. 北京: 地质出版社.

- 梁永平,王维泰. 2010. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征. 地球 学报. (06): 860~868.
- 罗璐,庞忠和,杨峰田. 2015. 苏北盆地建湖隆起碳酸盐岩储层中的 硫酸盐型热矿水成因. 地学前缘. 22(02): 263~270.
- 马瑞. 2007. 碳酸盐岩热储隐伏型中低温热水的成因与水一岩相互 作用研究.中国地质大学博士学位论文.
- 万利勤. 2008. 济南泉域岩溶地下水的示踪研究. 中国地质大学(北 京)博士学位论文.
- 王家乐. 2016. 济南岩溶水系统多级次循环模式分析及识别方法研 究. 中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 王庆兵,段秀铭,高赞东,Fred Kloosterman,周仰效,李文鹏. 2009. 济南岩溶泉域地下水流模拟.水文地质工程地质,(05):53 ~60.
- 徐军祥,邢立亭,魏鲁峰,等. 2012. 济南岩溶水系统研究. 北京: 冶 金工业出版社.

# Thermal anomaly mechanism of carbonate rock thermal storage in the shallow buried areas of northwestern Jinan

HU Caiping  $^{*\,1)}$  , WANG Nan  $^{2)}$  , SONG Liang  $^{1)}$  , BAI Xinfei  $^{1)}$  , WANG Tao  $^{1)}$  ,

LIANG Yunhan<sup>1)</sup>, SUN Xiaotao<sup>1)</sup>, PENG Wenquan<sup>1)</sup>

1) No. 1 Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Jinan, 250100;

2) Shandong Provincial Institute of Geological and Mineral Engineering Survey

(Shandong Provincial Bureau of Geological and

Mineral Exploration and Development No. 801 Hydrogeological Engineering Geological Brigade), Jinan, 250014 \* Corresponding author: caipinghu126@126.com

#### Abstract

In order to explore the formation mechanism of shallow-buried geothermal anomaly zone of carbonate rock thermal reservoir in the northern part of Jinan rock mass, this paper studied the geological characteristics, thermal storage characteristics, geothermal field characteristics and water chemistry characteristics of carbonate rock shallow buried geothermal anomaly area, using the means of geological drilling cataloging, pumping test, temperature measurement, water quality analysis and testing, etc. The results show that the thermal reservoirs in the shallow buried areas of carbonate rocks are developed in the Ordovician limestone strata, and the thermal reservoir karst fissures are well developed. The buried depth of thermal reservoir is  $150 \sim 1000$  m. The geothermal gradient of the geothermal anomaly zone is  $7.2 \sim 11.5 \text{ C}/100$  m. The water chemistry type is SO<sub>4</sub>-Ca type, and the TDS is  $1.3 \sim 1.5$  g/L. The geothermal water contains trace elements beneficial to human body. Geothermal water mainly sources from atmospheric precipitation, and the "ancient water" infiltrated 50 years ago in geothermal water is dominant. In addition to normal ground temperature conduction, the Jinan rock mass forces the water to flow deep after the heating, and the faults linked to the deep heat source is also an important factor in the formation of geothermal anomaly zone.

Key words: geothermal; geothermal anomaly zone; carbonate rock; geothermal formation mechanismf