



山东省深部岩溶热储地热地质特征

冯守涛, 徐勇, 杨询昌

(山东省鲁北地质工程勘察院, 山东 德州 253015)

摘要:山东省的深部岩溶热储分布在济阳拗陷区、临清拗陷区的凸起(潜)区和鲁中隆起区、鲁西南潜隆起区、沂沭断裂带, 分布面积约 4.4 万 km², 其分布范围与寒武—奥陶纪地层分布基本一致。深部岩溶热储可划分深部裂隙—岩溶热储和深部岩—溶裂隙热储 2 种类型, 具层状及层状兼带状特征。该文在总结前人成果的基础上, 对深部岩溶热储的埋藏与分布、水质、地温场特征、深部岩溶发育规律和地热流体形成条件进行了论述, 以期能对开发利用这一热储有所帮助。

关键词:寒武—奥陶纪; 深部岩溶; 热储; 山东

中图分类号:P641.3 **文献标识码:**B

深部岩溶是指位于所处水文体系的排泄基准面以下所发生的岩溶作用及所形成的孔洞或洞穴^[1], 深部岩溶热储是指赋存于一定深度内岩溶地层中、具备热储一般性质的热储层。根据山东省深部岩溶热储埋藏分布和地温场空间变化特征, 该文所指深部岩溶热储是指埋深在 500~3 000 m 内赋存于寒武—奥陶系中的岩溶热储, 该热储因埋藏较深、地质条件复杂, 同时受岩溶、裂隙发育程度的影响, 其富水规律各地差异性比较大。

1 区域地质背景

1.1 地质构造

山东省在中国大地构造位置上处于华北板块的东南缘, 以沂沭断裂带、郝官庄—山相家断裂及牟平—即墨断裂带为界, 自西向东分为华北陆块和苏鲁造山带 2 个一级构造单元^[2]。以分划性断裂聊考断裂、齐广断裂、沂沭断裂带、郝官庄—山相家及牟平—即墨断裂带为界, 自西向东划分为华北拗陷(I)、鲁西隆起(II)、鲁东隆起(III)、胶南—威海隆起(IV) 4 个二级构造单元。中生代以来, 受喜马拉雅运动与燕山运动的影响, 断裂构造发育, 将各隆起、拗陷划分为 9 个三级构造单元, 即济阳拗陷区(I a)、临清拗陷区(I b)、鲁中隆起区(II a)、鲁西南潜隆起区

(II b)、沂沭断裂带(II c)、胶北隆起区(III a)、胶莱拗陷区(III b)、威海隆起区(IV a)、胶南隆起区(IV c)。在拗陷区和隆起区内受断裂活动的影响和控制, 形成了四级构造单元及众多的次级构造单元——凸起与凹陷。

山东省内断裂构造切割较深, 对 II、III 级构造单元的分布具有控制作用的分界断裂有: 聊城—兰考断裂带、齐河—广饶断裂带、沂沭断裂带、郝官庄—山相家断裂和牟平—即墨断裂带。

1.2 地层

山东省地层发育较齐全, 除缺失奥陶系上统、志留系、泥盆系等地层外, 其他均有出露。总的特点是, 鲁西、鲁北平原地区老地层均被第四系覆盖; 鲁中南中低山丘陵地区地层发育较全, 以新太古代泰山岩群为结晶基底, 古生界发育为特点; 鲁东低山丘陵地区以胶东岩群、粉子山群、蓬莱群为结晶基底, 缺失古生界为特点。

深部岩溶热储主要赋存于古生界寒武—奥陶系中, 寒武—奥陶纪地层分布在沂沭断裂带内的安丘—莒县断裂以西地区, 主要由一套 1 800 余米厚的海相碳酸盐岩组成, 自下而上划分为 2 群 9 组 22 段^[2]。

收稿日期: 2013-05-13; 修订日期: 2013-08-28; 编辑: 王秀元

作者简介: 冯守涛(1978—), 男, 山东禹城人, 工程师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质、地热地质调查等工作; E-mail: fst197809@163.com。

1.2.1 早—中寒武世长清群

长清群处于寒武系下部,与下伏震旦纪土门群平行不整合接触,与上覆九龙群整合接触。长清群属陆表海碎屑岩—碳酸盐岩沉积岩系,依其岩石的组合特征由上到下划分为李官组、朱砂洞组及馒头组,岩性以页岩、砂岩及灰岩、白云岩等为主。总厚度 433~731 m。

1.2.2 中寒武世—早奥陶世九龙群

九龙群是跨系的岩石地层单位,属中寒武世—早奥陶世,与下伏长清群整合接触,与上覆马家沟群平行不整合接触。九龙群主要由碳酸盐岩组成,地层厚度一般在 600 m 左右。九龙群由下而上划分为张夏组、崮山组、炒米店组、三山子组及亮甲山组。

1.2.3 奥陶纪马家沟群

马家沟群在山东分布较广泛,由相间分布的白云岩、灰岩组成,夹灰色白云岩、灰质白云岩、灰色泥灰岩、泥质白云岩等,其由下而上划为东黄山组、北庵庄组、土峪组、五阳山组、阁庄组、八陡组等 6 个,总厚 561~1 267 m。

2 深部岩溶热储特征

2.1 热储类型

根据深部岩溶发育的空间形态,深部岩溶热储

可划分深部裂隙-岩溶热储和深部岩溶-裂隙热储 2 种类型。

深部裂隙-岩溶热储主要赋存于古生代奥陶系中,热储岩溶形态以溶蚀裂隙、溶孔、溶洞为主,构造裂隙次之,空间上多呈层状或似层状分布,代表性岩性为灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩、白云岩等,主要分布在鲁西北、鲁西南及鲁中南等局部凹陷区。

深部岩溶-裂隙热储主要赋存于下古生代寒武系中,岩溶形态类型以构造裂隙、风化裂隙为主,空间上具层状及层状兼带状特征,代表性岩性为灰岩、白云岩、泥质灰岩、泥质白云岩与砂、页岩互层等,主要分布在奥陶系被剥蚀的鲁中南及鲁西北与鲁西南局部凸起区。

2.2 热储特征

深部岩溶热储分布在济阳拗陷区、临清拗陷区的凸起(潜)区和鲁中隆起区、鲁西南潜隆起区、沂沭断裂带,分布面积约 4.4 万 km²(图 1),分布范围与寒武—奥陶纪地层分布基本一致,并受断裂构造控制。从图 1 中可以看出,埋藏深度小于 1 000 m 的深部岩溶热储主要分布在济阳拗陷区的广饶凸起、寿光凸起,鲁中隆起区、鲁西南潜隆起区的凸起和部分凹陷(热储盖层为新近系),济阳拗陷区和临清拗陷区的凹陷区热储埋藏深度普遍大于 3 000 m。

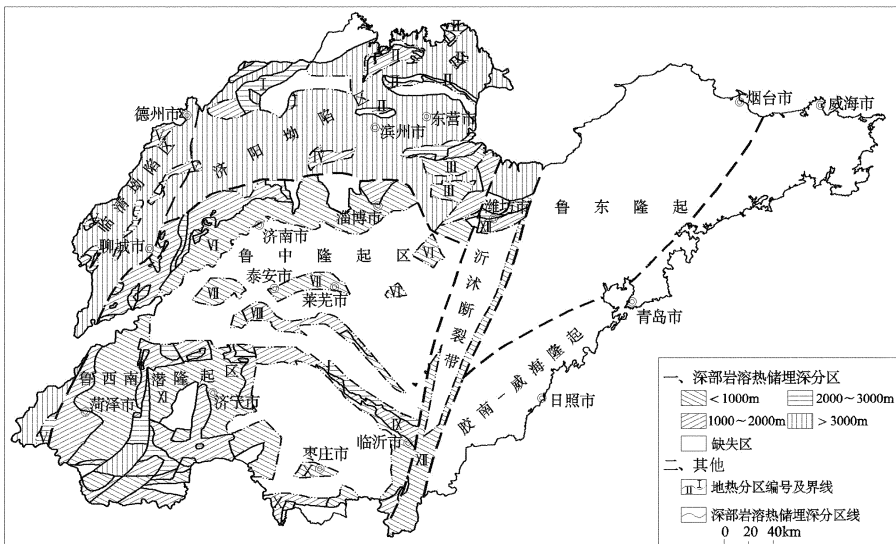


图 1 山东省深部岩溶热储分布图

根据深部岩溶热储的埋藏分布、岩溶发育程度、地温场空间变化特征和所处构造单元的不同,可划

分为埕子口-宁津潜断隆地热区、沾化-车镇潜断陷地热区、惠民潜断陷地热区、东营潜断陷地热区、临

清坳陷地热区、泰山-沂山断隆地热区、泰莱断陷地热区、大汶口-蒙阴断陷地热区、泗水-平邑断陷地热区、枣庄断褶带地热区、鲁西南潜隆起地热区和沂沭断裂带地热区 12 个地热区^[3]。各地热区深部岩溶热储特征见表 1。

2.2.1 济阳坳陷区

济阳坳陷区的深部岩溶热储分布在宁津凸起、刁口凸起、义和庄凸起、孤岛凸起、青坨凸起、陈庄凸起、滨州凸起、广饶凸起、双河凸起、寿光凸起、高青凸起、王判凸起等凸起区和长官凹陷、昌乐凹陷等凹陷区,总分布面积 6 021 km²。热储盖层为新近系、古近系和石炭-二叠系;热储顶板埋深 500~3 000 m,热储厚度 50~300 m,热储岩性为奥陶纪马家沟群灰岩、白云岩和寒武纪灰岩,测井孔隙度 0.8%~9.51%,渗透率(0.1~0.573)×10⁻³ μm²。

目前,在孤岛凸起、昌乐凹陷已成功钻凿岩溶热

储地热井,热储涌水量 500~2 000 m³/d,水温 39.0~98.5℃,矿化度 3~20 g/L。其他地区尚未有地热井,只是在石油勘探过程中,钻遇裂隙岩溶热储,如位于宁津凸起的 ZK1 孔揭露奥陶纪灰岩裂隙岩溶热储 181 m,其中马家沟群八陡组岩性主要为灰岩、白云岩、泥灰岩及白云岩夹薄层绿灰色泥岩,顶部为一层灰黄色灰岩,测井孔隙度 0.8%~5.8%,平均 2.7%,渗透率(0.100~0.573)×10⁻³ μm²。灰岩裂缝较发育,被方解石充填,荧光白云岩、白云岩、泥灰岩裂缝不发育;阁庄组岩性主要为深灰色灰岩,裂缝较发育,测井孔隙度 3.754%,渗透率 0.229×10⁻³ μm²。陈庄凸起、青坨凸起、滨州凸起和寿光凸起缺失奥陶系,裂隙岩溶热储赋存在寒武纪地层中,石油钻孔揭露热储埋深为 1 000~1 500 m,热储厚度 20~150 m,热储温度 63.5℃~75.0℃,矿化度 8.9 g/L。

表 1 深部岩溶热储特征

地热分区及编号	面积 (km ²)	热储埋深 (m)	热储厚度 (m)	热储温度 (℃)	涌水量 (m ³ /d)	矿化度 (g/L)	热水主要化学类型
济阳坳陷区 埕子口-宁津潜断隆地热区(I)	1309.7	1000~3000	50~250	62.5~98.5		3~10	Cl-Ca,SO ₄ -NaHCO-Na
沾化-车镇潜断陷地热区(II)	1325.8	1000~3000	50~300	52.0~98.5	800~2000	5~20	Cl-Ca,SO ₄ -NaHCO-Na,Cl-Na
东营潜断陷地热区(III)	3040.3	500~3000	100~300	39.0~98.5	500~1500	3~20	SO ₄ ·Cl-Na,Cl-Ca
惠民潜断陷地热区(IV)	344.6	1000~1500	250~300	65.0~70.0	—	5~10	Cl-Na
临清坳陷地热区(V)	1216.1	1000~3000	50~300	67.0~98.5		2~20	Cl·SO ₄ -Na·Ca
鲁中隆起区 泰山-沂山断隆地热区(VI)	9461.2	500~3000	100~350	32.5~62	500~3000	0.5~7	Cl-Na,SO ₄ -NaSO ₄ ·Cl-Ca·Na
泰莱断陷地热区(VII)	1365.6	500~2200	100~200	31.0~82.3	450~1000	1~3	Cl·SO ₄ -Na·Ca
大汶口-蒙阴断陷地热区(VIII)	1316.0	500~1500	100~200	32.5~46.5	2000~2500	2~3	SO ₄ ·Cl-Na·Ca
泗水-平邑断陷地热区(IX)	2955.4	500~2500	100~300	28.5~65.0	500~1500	2~10	Cl-Na,SO ₄ ·Cl-Na,SO ₄ ·HCO ₃ -Na
枣庄断褶带地热区(X)	1031.2	500~1500	100~200	31.0~55.5	—	1~3	Cl·SO ₄ -Na·Ca
鲁西南潜隆起区(XI)	16896.7	500~3000	100~250	31.0~68.0	1500~3000	1~5	SO ₄ -Ca·NaSO ₄ -Ca
沂沭断裂带地热区(XII)	4094.4	500~3000	50~250	39.3~84.3	200~1500	1~3	SO ₄ ·Cl-Na·Ca,SO ₄ -Na·Ca,Cl·SO ₄ -Na

2.2.2 临清坳陷区

临清坳陷区的深部岩溶热储分布在老城凸起、高唐凸起、魏庄凸起和东明凹陷,总分布面积 1 216.1 km²。热储盖层为新近系、石炭-二叠系,热储顶板埋深 1 000~3 000 m,其中老城凸起、高唐凸起北段顶板埋深较浅为 1 000~1 500 m,其他地区顶板埋深 1 500~3 000 m。热储厚度 50~300 m,热储岩性主要为奥陶纪马家沟群和三山子组灰岩、泥灰岩、白云质灰岩、白云岩、灰质白云岩等,裂缝较发育,裂隙层占地层厚度的 30.0%,测井解译裂隙孔

隙度为 0.16%~8.37%,平均孔隙度 2.85%。

目前,该区尚未钻凿岩溶热储地热井,按平均地温梯度为 3.2~4.0℃/100 m 推算,热储温度为 67.0~98.5℃。

2.2.3 鲁中隆起区

鲁中隆起区的深部岩溶热储分布在阳谷-齐河凸起、邹平-周村凹陷、泰山凸起、鲁山凸起、沂源凹陷、肥城凹陷、泰莱凹陷、汶口凹陷、汶东凹陷、蒙阴凹陷、泗水凹陷、平邑凹陷、枣庄凹陷和韩庄凹陷,总分布面积 16 129.4 km²。热储盖层为新近系、石炭-

二叠系,热储顶板埋深 500~2 500 m,热储厚度 100~350 m,热储岩性为寒武-奥陶纪灰色厚层、中厚层灰岩、泥质灰岩,受断裂构造影响,岩溶热储裂隙较为发育,可见小溶孔、溶洞,裂隙层占地层厚度的 30%~60%。测井孔隙度 1.75%~23.55%,渗透率 $(11.08\sim 13.72)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

目前,在齐河、东昌府区、东阿、张店区、沂源、泰安岱道庵、莱芜、肥城安驾庄、平邑汪家坡、临沂市等地均已成功钻凿岩溶热储地热井,涌水量 450~3 000 m³/d,水温 28.5~82.3℃,矿化度 1~10 g/L。

2.2.4 鲁西南潜隆起区

鲁西南潜隆起区的深部岩溶热储分布在菏泽-兖州潜断隆区,分布面积 16 896.8 km²。热储盖层主要为第四系、新近系、古近系、侏罗-白垩系及石炭-二叠系等,热储顶板埋深 500~3 000 m,其中巨野-兖州-鱼台一带及滕州西、单县南等地顶板埋深小于 1 000 m,单县东北、汶上县西、宁阳县南等地顶板埋深 2 000~3 000 m,其他地区顶板埋深 1 000~2 000 m。热储厚度 100~250 m,热储岩性为寒武-奥陶纪灰岩。据曲热 1 井钻孔测井资料,孔隙度为 2.84%~4.55%,平均 3.7%,渗透率 $(0.18\sim 0.81)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均 $0.52\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

目前,在菏泽、曹县庄寨、郓城、鄄城、定陶、滕州、东阿等地已成功钻凿岩溶热储地热井,涌水量 1 500~3 000 m³/d,井口水温 40.0~68.0℃,矿化度 3.6~4.1 g/L。

2.2.5 沂沭断裂带

沂沭断裂带的深部岩溶热储分布在沂沭断裂带内的潍坊潜断陷、马站-苏村断陷、安丘-莒县断陷和郯城断陷,分布面积 3 591.5 km²。热储盖层为第四系、侏罗-白垩系及石炭-二叠系,热储顶板埋深 500~3 000 m,其中潍坊地区埋深较大,其顶板埋深超过了 1 500 m,其他地区顶板埋深一般小于 1 500 m,铜井地区埋深最小约 200 m。热储厚度 50~250 m,热储岩性为寒武-奥陶系灰岩。

目前,在汤头、铜井、松山、沂水县城区等地钻凿有岩溶热储地热井,涌水量 200~1 500 m³/d,井口水温 39.3~84.3℃,矿化度 1.7~2.8 g/L。

2.3 地温场特征

根据地热井成井时的测温资料与石油钻孔测温资料,深部岩溶热储温度一般在 40~90℃,部分地区温度最高超过 100℃,最小仅 30℃左右,属温热

水-热水型中低温地热资源。总的来看,鲁西北拗陷地热区温度最高,一般 50~90℃;鲁西南潜隆起地热区温度次之;鲁中南地区温度相对较低,除铜井、肥城安驾庄及平邑-临沂一线以北等部分地区温度相对较高外,其他地区深部岩溶热储温度一般均小于 50℃。区内深部岩溶水温在不同的地区存在一定差异,这主要是由于岩溶水在补给、径流、排泄区水动力条件不同,且受断裂及构造隆起与凹陷、地层岩性组合、岩溶发育程度、岩溶地层埋藏深度等因素影响,使得地球深部热流在向上传导过程中的再分配存在不均匀性。

在垂向上,深部岩溶热储温度一般随深度的增加而增加,但深部岩溶热储地温梯度一般较上部小。如孤岛地区孤古 2 井钻孔平均地温梯度在 3℃/100 m 左右,而深部岩溶热储地温梯度约 2℃/100 m,明显小于上部盖层地温梯度及全孔平均地温梯度(图 2),在鲁西南潜隆起及鲁中南等地区表现更为明显,深部岩溶热储地温梯度更低,如菏泽、郓城地热井测温资料表明,深部岩溶热储温度随深度变化很小,地温梯度大大小于全孔平均地温梯度及盖层地温梯度(图 3),其主要原因是深部热储岩溶发育,地下水交替活动强烈所致。

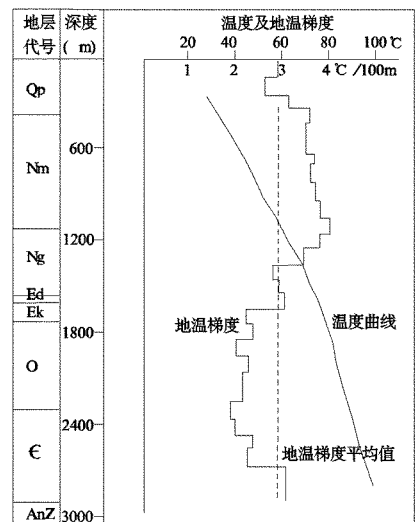


图 2 孤古 2 井地热剖面图

2.4 水质特征

深部岩溶热储地热流体化学特征受沉积环境、埋深及构造条件等影响,不同构造单元、不同深度水化学特征差别比较大,水化学类型复杂,济阳拗陷区水化学类型为 SO₄-Na, Cl-Na, SO₄·Cl-Na, 矿化度 5.0~17.2 g/L, pH 值 7.0~8.2;鲁中隆起区

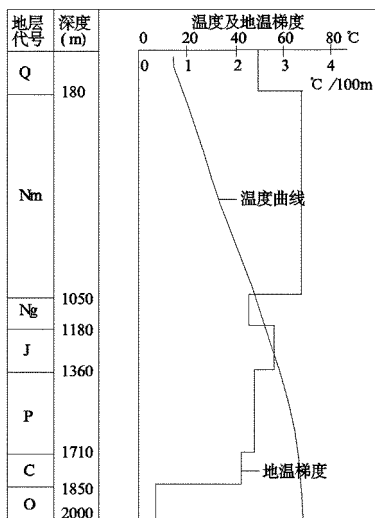


图 3 曹煤 1 井测温、地温梯度曲线示意图

水化学类型为 $Cl \cdot SO_4 - Na \cdot Ca, Cl - Na, SO_4 - Na, SO_4 \cdot Cl - Ca \cdot Na, SO_4 \cdot Cl - Na, SO_4 \cdot Cl - Na \cdot Ca, SO_4 \cdot HCO_3 - Na, SO_4 - Ca$, 矿化度 0.6~8.1 g/L, pH 值 6.9~8.1; 鲁西南潜隆起区水化学类型为 $SO_4 - Ca \cdot Na, SO_4 - Ca$, 矿化度 3.6~4.0 g/L, pH 值 7.0~7.6; 沂沭断裂带水化学类型为 $Cl \cdot SO_4 - Na, SO_4 \cdot Cl - Na \cdot Ca$, 热水矿化度 1.9~2.8 g/L, pH 值 7.7~7.8。各单元地热流体主要化学组分平均含量见表 2。

水平方向上由东向西、由南向北, 地热流体的补给径流途径越来越长, 水循环交替条件越来越差, 地下水基本处于很深的封闭状态, 围岩中的化学成分被热水大量溶解, 因此水化学成分越来越复杂, 矿化度越来越高(图 4), 如在济阳拗陷区, 矿化度一般都

表 2 深部岩溶热储地热流体化学特征

构造单元	K ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	矿化度(g/L)	pH 值
济阳拗陷区	4.8~161.05	1175~5620	71.82~676.4	5.44~85.4	404.77~10048.19	1121.6~2676.23	257.09~515.7	5~17.2	7.0~8.2
鲁中隆起区	5.43~83.58	88~2188.08	27.1~841.22	4.53~162.92	33.62~2818.6	216.19~2347.24	86.66~329.36	0.6~8.1	6.9~8.1
鲁西南潜隆起区	20.67~47.24	270~516.25	482.04~656.51	81.82~136.11	310.28~473.33	1809.89~2214.77	161.94~196.43	3.6~4.0	7.0~7.6
沂沭断裂带	21.65~42.25	447.95~752.5	156.59~172.37	4.16~7.2	263.81~1143.54	553.17~909.67	66.67~101.91	1.9~2.8	7.7~7.8

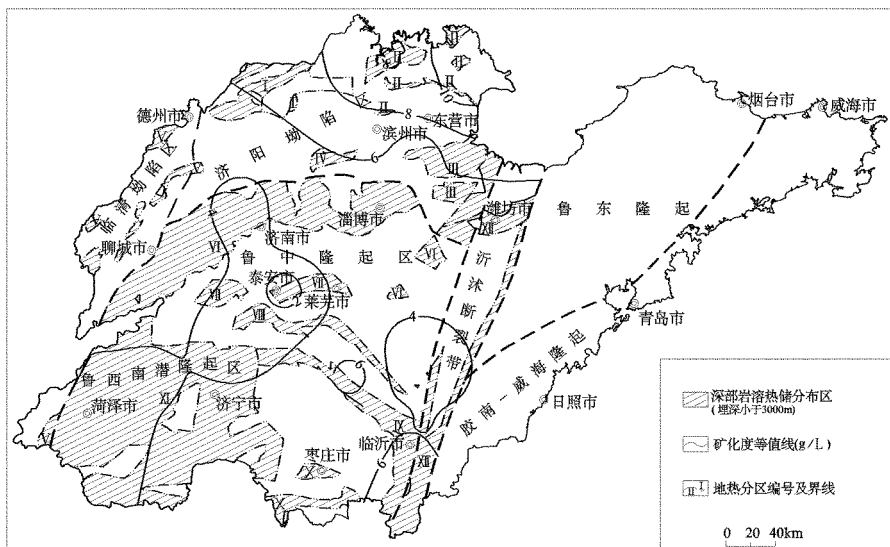


图 4 深部岩溶热储矿化度等值线图

超过 6 g/L, 而在鲁中隆起区和鲁西南潜隆起, 矿化度普遍小于 6 g/L。垂向上也有相似的规律, 即热储埋藏越深, 水化学成分越复杂, 矿化度越高, 这在济阳拗陷区表现较为明显, 如凹陷区热水矿化度明显高于凸起区。

2.5 资源量

深部岩溶热储地热资源丰富, 依据《地热资源地质勘查规范》(GB11615-2010)、《地热资源评价方法》(DZ40-85), 采用热储法计算法地热资源量为 109.49×10^{16} kJ, 折合标准煤 373.43×10^8 t; 可利用

地热资源量为 17.57×10^{16} KJ, 折合标准煤 59.93×10^8 t。采用容积法计算静储量为 $3\,570.244\,0 \times 10^8$ m^3 。按开采期限 100 a, 降深 300 m 进行计算, 全省深部岩溶热储地热流体允许开采量为 54.95×10^8 m^3 , 即 $5\,495 \times 10^4$ m^3/a 。

3 深部岩溶发育规律

岩溶发育程度一般随着深度的增加而逐渐减弱, 其发育深度一般在侵蚀面以下 500 m^[4-6]。如聊古 2 井, 该井钻探深度 1 263.15 m, 揭露奥灰侵蚀面下深度为 230 m, 根据测井资料, 该井侵蚀面以下 0~50 m 平均孔隙度达 9.1%, 50~200 m 平均孔隙度达 7.8%, 200 m 以下平均孔隙度为 3.5%。局部地区岩溶发育深度可达 500~1 000 m, 如梁古 1 井, 该井钻探深度达 4 186 m, 揭露奥灰侵蚀面下深度为 717 m, 根据测井资料, 该井平均孔隙度达 2.85%, 其中侵蚀面下 500 m 内平均孔隙度达 3.2%, 在侵蚀面下 500~717 m 平均孔隙度达 2.13%。

根据山东地质发展历史, 区内寒武—奥陶系岩溶发育主要经历了加里东期和燕山—喜山期作用^[7]。加里东期以垂直淋滤型岩溶和顺层岩溶作用为主, 尤其是沿具有晶间孔的准同生白云岩层和成岩白云岩层的岩溶作用明显。由于加里东晚期地壳上升幅度较大而且持续时间较长, 因此其侵蚀面以下岩层岩溶发育程度较好。据区内石油钻孔放空、漏失资料统计(表 3), 在加里东期, 侵蚀面以下 0~50 m, 50~200 m, >200 m³ 个深度带内放空、漏失频率分别为 8.7%, 22.1% 和 12.3%, 即该期岩溶作用在地层侵蚀面以下 50~200 m 岩溶发育最好, 0~50 m 和 >200 m² 两个深度带内岩溶发育程度相对较差。燕山—喜山期的岩溶作用多发生在迂回返型和中隆新凹型地质结构的高部位, 在地层层序上表现为下古生界直接被新生界和中生界不同层位所覆盖。在侵蚀面以下 0~50 m, 50~200 m, >200 m³ 3 个深度带内放空、漏失频率分别为 31.7%, 10.2%, 5.3% 和 27.8%, 20.5%, 15.4%, 即在侵蚀面以下 0~50 m 岩溶发育最好, 50~200 m 发育较好, 大于 200 m 发育相对较差。当然, 不同时期其垂向发育规律并不完全一致, 特别受断裂活动影响, 其岩溶发育深度可达侵蚀面以下上千米^[8]。

表 3 钻孔漏失频率分布统计

时期	侵蚀面以下深度(m)	钻遇该深度总钻井数(口)	放空、漏失井数(口)	频率(%)
加里东末期	0~50	115	10	8.7
	50~200	104	23	22.1
	>200	65	8	12.3
燕山期	0~50	145	46	31.7
	50~200	98	10	10.2
	>200	57	3	5.3
喜山期	0~50	115	32	27.8
	50~200	39	8	20.5
	>200	13	2	15.4

4 深部岩溶热储地热流体形成条件

地热流体的形成主要与地壳深部的地幔结构、岩浆活动和地壳浅部地质构造、地层岩性、地下水活动等因素有关, 一般由热源、热储、盖层和地热流体补给源四要素组成。

4.1 热源

该区深部岩溶热储的热源主要来自 3 个方面: 一是来自正常的地壳深部及上地幔传导热流和深部岩浆热。自中生代以来, 受燕山期地壳运动的影响, 形成了区内沧东、聊城—兰考、齐河—广饶等规模较大的超壳断裂, 深度至莫霍面, 使上地幔物质上涌或沿深大断裂岩浆侵入到地壳浅部, 从而形成了区域温度或热流值普遍升高的背景。由于沉降的差异, 其热流分配不均, 产生了在正向构造隆起或凸起区的热流值高于负向构造拗陷或凹陷的热流值。二是断裂活动产生的磨擦热及其伴随的岩浆喷发过程中的热能。区域在中生代燕山运动和新生代喜山运动期间, 断裂活动频繁, 并伴随多期岩浆侵入活动岩浆在喷发过程中的热能, 断裂带和岩浆侵入体对地壳深部的热源起了重要沟通和传导作用, 断裂活动过程中本身也会提供一定的摩擦热能。三是在压实、石化过程中产生一定的物理—化学压缩热, 以及新生代古近纪的生油、储油形成过程中化学反应产生的热能, 为该区提供了部分热能。

4.2 热储

热储通常指埋藏于地下, 具有一定有效孔隙度和渗透性, 并储存有一定的地热流体可供开发利用的地质构造。区内沂沭断裂带及其以西地下深处分布有大面积的寒武—奥陶纪碳酸盐岩可溶岩地层。特别是分布广泛的寒武—奥陶纪张夏组与奥陶纪马家沟群

灰岩,这套厚层的碳酸盐岩系,为该区深部岩溶的发育提供了物质基础。该碳酸盐岩系在过去频繁的构造活动、水动力作用以及膏溶、岩浆入侵、混合溶蚀等作用下,深部岩溶裂隙特别发育,形成了较大的储热空间,导水能力强,为地下水深循环、储热创造了条件,并形成了区内不同类型的深部岩溶热储。

4.3 盖层

该区深部岩溶热储盖层主要包括第四系、新近系、古近系、侏罗-白垩系、石炭-二叠系等以及侵入岩体。第四纪松散沉积层的粘性土与砂性土组成的松软层,新近纪明化镇组、馆陶组和古近纪东营组泥岩与砂质泥岩等保温盖层岩性密度较小,厚度大,导热性能差,阻热大,是很好的天然良好保温盖层;侏罗-白垩纪粉细砂岩、泥页岩,以及石炭-二叠系成岩程度较高,导热率和地热散失率较低的泥岩、砂岩等,也构成了区内深部岩溶良好的天然保温盖层。另外,区内部分地区碳酸盐岩地层上部覆盖了较厚的侵入岩体以及热储中的部分泥岩、页岩也是区内深部岩溶良好的天然保温盖层。

由于区内寒武-奥陶系深部碳酸盐岩裂隙岩溶热储及盖层受断裂构造控制明显,因此不同类型不同区域热储盖层厚度、岩层等差异较大。鲁西北层状深部岩溶热储分布区及聊考-齐广断裂带附近,保温盖层分布较连续,厚度较大,其他地区保温盖层分布不连续,厚度相对较小。鲁中南及沂沭断裂带内,部分以岩溶-裂隙热储为主的地区,其保温盖层多为侵入岩体,分布不连续,其他层状热储为主的地区其保温盖层多为中、新生代地层,连续性较好,厚度较大。

4.4 地下热水的补给来源

因埋藏深度、分布区域不同,区内深部岩溶热储地热流体的补给源也不完全相同。在鲁西北、鲁西及鲁中南层状深部岩溶热储区,因岩溶热储埋藏较深,其地热流体主要来自东部、南部山区古大气降水经漫长的深循环远距离补给。由于地下水循环深,流速缓慢,径流路径很远,水-岩作用时间很长,使地下水有充足的时间加热,因此形成了高矿化度的地热流体。在聊-考断裂以东、齐-广断裂以南的深部岩溶区是一个相对独立的裂隙岩溶含水系统,除部分来自远距离古大气降水补给外,地热流体补给源主要为鲁中、鲁中南山区地下水经深循环径流补

给。在鲁中、鲁中南及沂沭断裂带受断裂控制明显,且埋藏较浅的带状热储区,地热流体补给来源主要为深部岩溶外围裸露区的大气降水与河流垂直入渗径流、孔隙水的越流,以及裂隙-岩溶水通过构造及深部裂隙-岩溶通道径流补给。

5 结论

(1)根据深部岩溶发育的空间形态,深部岩溶热储可划分深部裂隙-岩溶热储和深部岩溶-裂隙热储两种类型。

(2)深部岩溶热储分布在沂沭断裂及其以西的寒武-奥陶系中,其分布范围与寒武-奥陶纪地层分布基本一致,面积约 4.4 万 km^2 ,热储地热资源丰富,地热资源量为 109.49×10^{16} kJ,折合标准煤 373.43×10^8 t;可利用地热资源量为 17.57×10^{16} kJ,折合标准煤 59.93×10^8 t。静储量为 $3\,570.2440 \times 10^8 \text{ m}^3$,允许开采量为 $54.95 \times 10^8 \text{ m}^3$,即 $5\,495 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(3)深部岩溶热储埋藏受断裂构造控制,具有明显的差异性,鲁西北拗陷区深部岩溶热储埋藏深度较大,凸起区一般在 500~1 000 m,凹陷区一般大于 2 000 m,热储温度一般 50~90℃。鲁西隆起区的北部聊考-齐广断裂一带,以及郓城-泗水-平邑北及曹县-成武等凹陷区深部岩溶热储埋藏较深,一般大于 2 000 m,其他地区深部岩溶热储埋藏深度一般小于 2 000 m。沂沭断裂带中南部深部岩溶热储埋深一般 500~1 000 m,北部潍坊一带凹陷区埋深 1 000~3 000 m,铜井、松山等局部地区埋深小于 500 m。

(4)岩溶发育程度一般随着深度的增加而逐渐减弱,其发育深度一般在侵蚀面以下 500 m,局部地区岩溶发育深度可达 500~1 000 m。不同时期其垂向发育规律并不完全一致,特别受断裂活动影响,其岩溶发育深度可达侵蚀面以下上千米。

(5)开发利用深部岩溶热储时,首先要分析论证宏观地热地质条件是否具备,即只有具备了通常所说的储、热、通、源四大因素,才有进一步工作的基础。由于岩溶裂隙发育的不均一性,应综合采用遥感、物探、地热地质调查、地球化学调查等手段,查清地层结构、断裂构造,确定孔位。

参考文献:

- [1] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [2] 山东省国土资源厅资源储量处, 山东省国土资源资料档案馆. 山东省矿产资源储量报告编制指南[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2010.
- [3] 王成明, 杨询昌, 徐勇, 等. 山东省深部岩溶热储地热水同位素特征分析[J]. 山东国土资源, 2013, 29(1): 23.
- [4] 熊道锟. 岩溶发育强度垂直分带方法[J]. 岩土工程技术, 2005, 19(3): 9-13, 18.
- [5] 郭建华. 塔北、塔中地区下古生界深埋藏古岩溶[J]. 中国岩溶, 1996, 15(3): 207-215.
- [6] 李常锁, 赵玉祥, 王少娟, 等. 山东济南北部地热田富水规律分析[J]. 地球与环境, 2008, 36(2): 155-160.
- [7] 黄继新, 彭仕宓, 宋来明. 车镇地区下古生界碳酸盐岩潜山岩溶模式初探[J]. 煤田地质与勘查, 2006, 34(2): 1-4.
- [8] 陈墨香, 邓孝, 王钧, 等. 华北平原地下热水形成条件与赋存特征[J]. 地球科学, 1985, 10(1): 83-89.

Geothermal Characters of Deep Karst Thermal Reserve in Shandong Province

FENG Shoutao, XU Yong, YANG Xunchang

(Lubei Geo-engineering Exploration Institute, Shandong Dezhou 253015, China)

Abstract: Deep karst thermal reserves distribute in Jiyang depression area, convex (latern) area of Linqing depression and Luzhong uplift area, southwestern latern uplift area in Shandong province and Yishu fault belt. Its distribution square is about 44000km², and the distribution ranges are the same with the strata in Cambrian-Ordovician period. Deep karst reserves can be divide into deep crack-karst reserve and deep karst-crack reserve with the characters of layer type and strip type. On the basis of previous research results and the ideas of the authors, burying, distribution, water quality, characteristics of geothermosite, developing law of deep karst and the forming condition of geothermal fluid have been analyzed. It will provide help for development and utilization of thermal reserve.

Key words: Cambrian-Ordovician period; deep karst; thermal reserves; Shandong province