

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2018.01.02

引用格式: 谭志容, 康凤新. 山东省临清拗陷区岩溶热储地热能潜力分析[J]. 中国地质调查, 2018, 5(1): 10-15.

山东省临清拗陷区岩溶热储地热能潜力分析

谭志容¹, 康凤新^{2,3}

(1. 山东省鲁北地质工程勘察院, 德州 253072; 2. 山东省地质矿产勘查开发局, 济南 250013;
3. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 济南 250013)

摘要: 山东省临清拗陷区内埋藏有巨厚的寒武系—奥陶系碳酸岩地层, 是地热开发的有利目标层位。在石油勘探过程中取得的地震解译与钻探成果基础上, 综合前人的研究成果, 编制了区内新生界平均地温梯度图及奥陶系顶板埋深等值线图, 采用地温梯度计算公式估算了奥陶系顶板地层的温度。结合寒武系—奥陶系地层厚度的空间分布情况, 以奥陶系顶板处 120 °C 作为地热资源量计算分区的起算温度, 并以 90 °C 作为地热资源利用的下限温度, 对地热发电的前景进行了预测。结果表明, 区内岩溶热储地热资源开发利用前景广阔, 可用于发电的地热资源量为 1.27×10^{15} MJ, 折合电能 1.35×10^5 MW, 其中 240 °C 高温区的地热资源就能满足区内供电需求。

关键词: 岩溶热储; 地热资源; 地温梯度; 地热发电

中图分类号: P314 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2018)01-0010-06

0 引言

增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS)与干热岩(hot dry rock, HDR)开发引起了世界各国的高度重视, 目前正在研究与试运行的干热岩发电项目主要有美国的芬顿山(Fenton Hill)、澳大利亚库珀盆地(Cooper Basin)、欧洲苏尔茨(Soultz)及日本的肘折(Hijiori)等^[1]。美国麻省理工大学于2005年成立了研究小组, 对美国的增强型地热资源开发的技术与经济可行性进行了研究。研究认为, EGS发电技术在各个方面已相对成熟, 到2050年全国EGS可以提供大于100 GW的价格适宜的发电量^[2]。我国干热岩地热资源丰富, 据汪集旻等^[3]估算, 中国大陆(3~10 km深度)干热岩地热资源总量为 20.9×10^{18} MJ, 合 714.9×10^{12} t 标准煤, 并指出近期应着眼于包括华北(渤海湾盆地)在内的6个地区4~7 km深度段干热岩的开发。

钻探成本高是增强型地热资源开发的主要障碍, 据Lowry等^[4]研究, 钻探费用随深度增加而急

剧增加。采用较先进的钻探技术, 一眼7 000 m深的干热岩钻孔费用大约在700万美元。李德威等^[5]综合考虑目前的科技水平和发展势态, 将作为地热能开采的干热岩埋深定为地下8 000 m之内。

以往石油勘探过程中发现, 山东省境内临清拗陷区在埋深8 000 m以内发育有巨厚的寒武系—奥陶系碳酸盐岩地层^[6], 是增强型地热资源开发的良好目标层位, 本文在总结前人研究成果的基础上, 对区内寒武系—奥陶系碳酸盐岩岩溶热储开发利用前景进行评述。

1 区域地质背景

1.1 地质构造

临清拗陷为中—新生代复合型断陷盆地^[7-9], 其中山东省部分位于临清拗陷区东部, 东以沧东断裂为界, 西以聊考断裂为界, 南北均以省界为界, 面积约5 000 km²。根据基底构造格局, 临清拗陷在山东省境内可进一步划分为德州凹陷、莘县凹陷及高唐—堂邑凸起3个构造单元^[10], 各凹陷内又分

收稿日期: 2017-08-09; 修订日期: 2017-11-02。

基金项目: 山东省地矿局“山东省地热资源综合评价(编号: 鲁地字[2017]23号)”项目资助。

第一作者简介: 谭志容(1975—), 女, 高级工程师, 主要从事水工环地质及地热地质研究工作。Email: 597943119@qq.com。

通信作者: 康凤新(1968—), 男, 研究员, 主要从事水工环地质及地热地质研究工作。Email: kangfengxin@126.com。

布有若干个中—新生代沉积中心(图 1)。

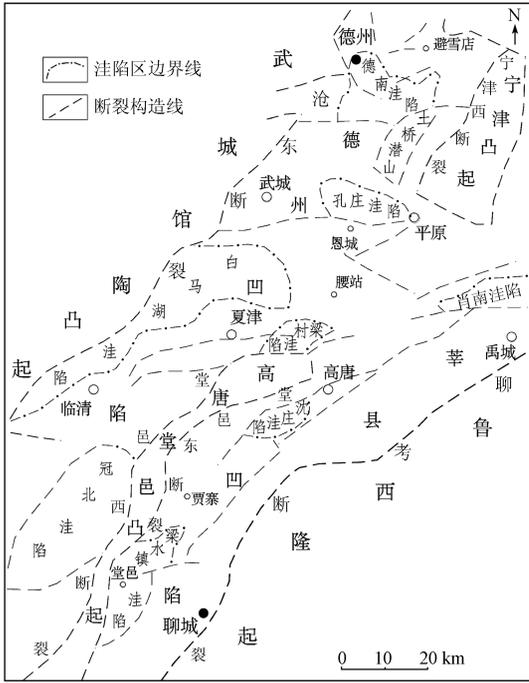


图 1 地质构造纲要图

Fig. 1 Geological structure sketch in the study area

区内断裂构造十分发育,主要包括 N(N)E、NEE(近 EW)向 2 组,并见有少量 NW 向断层。多为张性伸展断层,具有导热、导水性能。主要断层有聊城断裂、沧东断裂、宁津西断裂、堂邑东断裂和堂邑西断裂等。

1.2 地层

区内基底凹陷区地层发育较齐全,凸起区上古生界—古近系地层剥蚀,新近系直接与下古生界寒武系—奥陶系或太古宇角度不整合接触。根据区域地质条件,区内地层及其特征如下。

(1)太古宇泰山群:为本区最老的基底岩系,岩性主要为片麻岩,其次为闪长角闪岩和角闪岩,局部为黑云母石英片岩及黑云斜长变粒岩。

(2)下古生界寒武系—奥陶系:为陆表海相沉积,厚度约 1 200 m,与下伏太古宇不整合接触,主要为一套碳酸盐岩建造,夹有泥页岩和膏岩。岩性主要有灰岩、白云岩及页岩等。

(3)上古生界石炭系—二叠系:为一套以海退为主的海陆过渡相—陆相为主的含煤系碎屑岩沉积,厚度约为 800 m,下部的本溪组和太原组中发育有 10~20 m 厚的灰岩。

(4)中生界三叠系—白垩系:三叠系主要发育杂色陆相碎屑岩,侏罗系—白垩系发育杂色陆相碎屑

岩,并夹有安山岩、玄武岩等火成岩,厚度约 2 000 m。

(5)古近系:最大沉积厚度达 3 000 m,以砂泥岩互层为主,含薄层油页岩,与下伏地层呈角度不整合接触。其中孔店组—沙四段为滨浅湖—半深湖相沉积;沙三段、沙一段为深湖—半深湖—滨浅湖相沉积,暗色泥页岩及油页岩发育;沙二段、东营组为河流相沉积,为一套红色砂泥岩建造。

(6)新近系:上部为黄色黏土岩与砂岩互层,中部为红、黄色砂泥岩互层,下部为块状灰白色砂岩、砂砾岩及砾岩夹泥岩,厚约 1 000~1 200 m。

(7)第四系:岩性主要为棕黄色、灰黄色砂质黏土与棕黄色、灰黄色砂岩呈不等厚互层,厚 200~260 m。

1.3 地温场特征

区内在新生代馆陶组中发现有丰富的低温地热资源^[11-15],并广泛应用于建筑物冬季供暖。通过石油勘探孔及地热井的测温资料统计结果表明,区内新生界平均地温梯度为 2.9 °C/100 m(图 2)。地温梯度最高的是靠近高唐—堂邑凸起的莘 3 井,全井平均为 3.22 °C/100 m;其次是禹城洼陷南坡靠鲁西隆起的禹 8 井,平均为 3.2 °C/100 m。多数井 <3.0 °C/100 m,越靠近洼陷中心,地温梯度越低^[16]。由此可见,区内地热资源形成的热源主要为来自地球内部的传导热流。

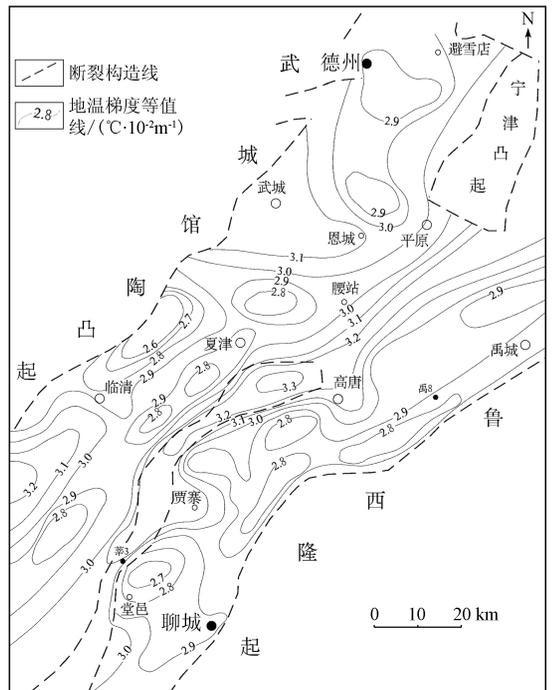


图 2 新生界平均地温梯度等值线图

Fig. 2 Contour map of average geothermal gradient of Cenozoic

2 岩溶热储特征

2.1 寒武系—奥陶系岩性特征

根据石油勘探孔堂古4、堂古1揭露,研究区寒武系—奥陶系为一套碳酸盐岩建造,自下而上可进一步划分为馒头组、张夏组、崮山组、炒米店组、三山子组和马家沟组,累计厚度平均1 200 m。

(1)馒头组:主要分布于莘县凹陷、堂邑凸起等地区,岩性为棕红色—紫褐色页岩夹灰色泥质灰岩、泥质白云岩等,厚120~260 m。

(2)张夏组:本区广泛分布,岩性以厚层状鲕粒灰岩为主,夹白云岩、白云质灰岩。厚度较稳定,约160~200 m,与下伏馒头组整合接触。

(3)崮山组:全区广泛分布,上部为泥晶灰岩、鲕粒灰岩或竹叶状灰岩,下部为灰色、灰绿色或紫褐色页岩,厚34~86 m,与下伏张夏组整合接触。

(4)炒米店组:全区广泛分布,岩性为灰色中薄层泥晶灰岩、泥灰岩夹薄层状砾屑灰岩为主,厚15~70 m,与下伏崮山组整合接触。

(5)三山子组:根据岩性特征可分为3段,下段岩性主要为厚层状灰色白云岩,个别井夹竹叶状灰岩、竹叶状白云岩,厚50~150 m;中段岩性以灰色块状白云岩为主,局部夹石膏,厚35~110 m;上段岩性以灰色厚层状细—微晶白云岩为主,局部夹石膏,白云岩中通常含燧石结核,厚35~100 m。

(6)马家沟组:根据岩性自下而上可分为6段,分别东黄山段、北庵庄段、土峪段、五阳山段、阁

庄段与八陡段,其中1段、3段和5段岩性主要为薄层状泥晶—微晶白云岩、泥质白云岩,局部夹灰白色石膏岩、膏质白云岩;2段、4段和6段岩性主要为厚层泥晶灰岩、白云质灰岩等。

2.2 寒武系—奥陶系分布特征

根据中原油田地震勘探及石油钻探成果,区内寒武系—奥陶系顶板埋深平均为6 000 m左右,在洼陷区埋深大,凸起区埋深小。其中,冠北洼陷区埋深为7 000~9 000 m;堂邑凸起埋深为3 000~4 000 m(图3,图4)。

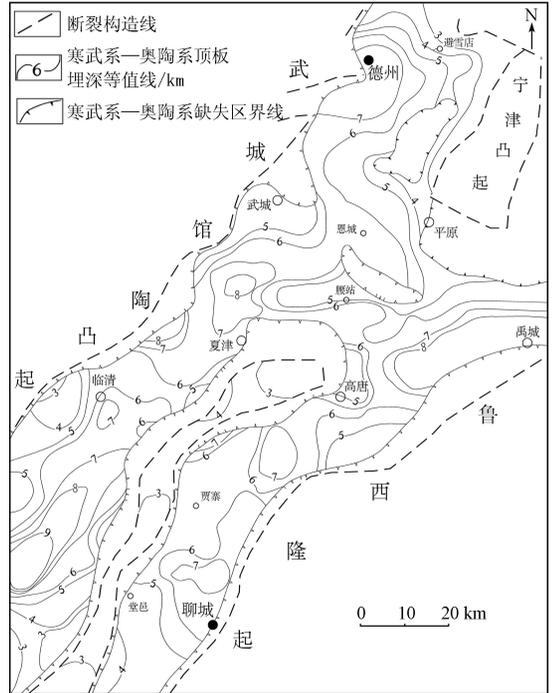


图3 奥陶系顶板埋深等值线图

Fig.3 Contour map of Ordovician burial depth

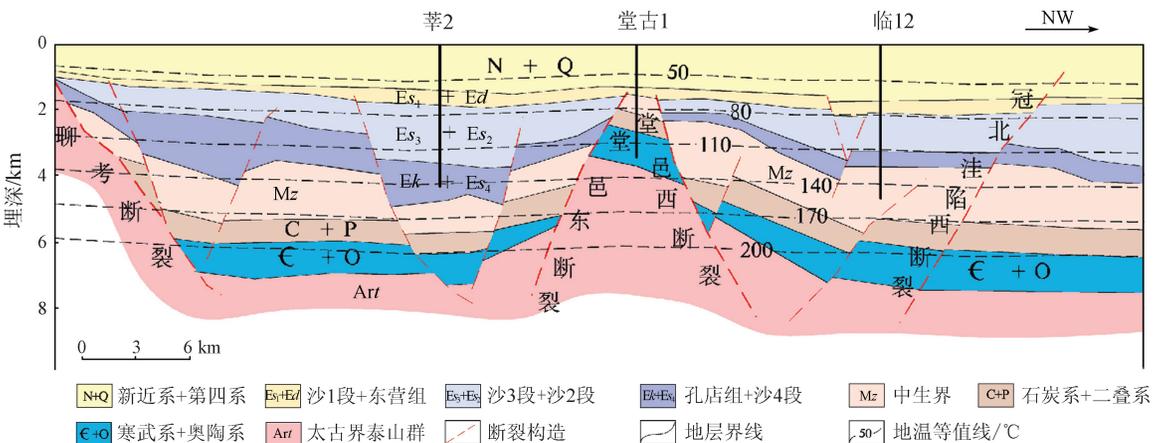


图4 研究区地层及温度分布剖面图

Fig.4 Profile of strata and temperature distribution in the study area

在德州凹陷、莘县凹陷及堂邑凸起中心区寒武系—奥陶系厚度达 1 200 m 左右,在凹陷及凸起的边缘厚度变薄直至尖灭(图 5)。

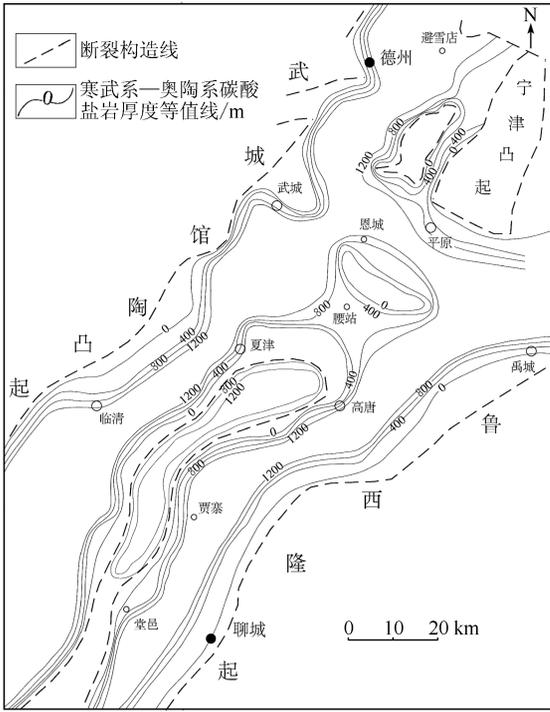


图 5 寒武系—奥陶系厚度等值线图^[17]

Fig.5 Contour map of Cambrian - Ordovician thickness^[17]

2.3 岩溶裂隙发育特征

区内基底断裂构造发育,寒武系—奥陶系地层岩性以灰岩、白云岩与泥灰岩等可溶性岩石为主,有利于岩溶裂隙的产生。白云岩在适宜条件下可充分溶解,发生重结晶作用,形成中小型溶孔、溶洞;灰岩一旦条件适合可迅速形成大中型溶洞^[18]。根据陈墨香^[19]统计结果,鲁西北地区下古生界碳酸盐岩岩溶裂隙发育段占地层厚度比值为 10% ~ 30%,其中寒武系的平均值为 10% ~ 15%,奥陶系平均值为 15% ~ 25%。由此可见,寒武系—奥陶系具备有利于地热开发的天然裂隙。此外,灰岩与白云岩为可溶性岩石,在水力压裂作用下,可以同时产生溶蚀作用,极大地降低了人工储层建造的难度。

2.4 寒武系—奥陶系地层温度估算

区内寒武系—奥陶系上覆地层主要为陆相杂色碎屑岩沉积,岩性以砂岩、页岩及泥岩为主,含煤系及油页岩地层。大地热流的计算公式为

$$q = \lambda \cdot G, \quad (1)$$

式中: q 为热流, W/m^2 ; λ 为岩石的平均热导率,

$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$; G 为平均地温梯度, K/m 。

其中 λ 受地层岩性的控制,华北平原内新生代地层的平均热导率为 $2.0 \sim 2.2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,中生代及上古生代砂页岩平均热导率 $2.05 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ^[19]。根据能量守恒原理,针对一个特定的区域,可以粗略的认为其大地热流为一定值,由此推测中生代与晚古生代地层中的地温梯度与上部新生代地层平均地温梯度大致相同。本次采用新生代地层中平均地温梯度及奥陶系顶板埋深来计算奥陶系顶板处的地层温度。计算公式为

$$t_r = (h - h_0) \cdot G + t_0, \quad (2)$$

式中: t_r 为地层温度, $^{\circ}C$; h 为地层埋深, m ; h_0 为恒温带埋深,取 $20 m$; t_0 为恒温带温度,取当地平均气温 $12 ^{\circ}C$ 。

根据计算结果(图 6),德州凹陷区奥陶系顶板处的地层温度自东北向西南增高,在冠北洼陷地温达 $240 ^{\circ}C$;凹陷边缘地温较低,为 $120 ^{\circ}C$ 左右;平均地温约 $180 ^{\circ}C$ 左右。高唐—堂邑凸起区奥陶系顶板处的地层温度 $120 \sim 140 ^{\circ}C$ 。莘县凹陷区奥陶系顶板处的地层温度整体呈现自西南向东北增高的趋势,平均地温约 $180 ^{\circ}C$ 左右。

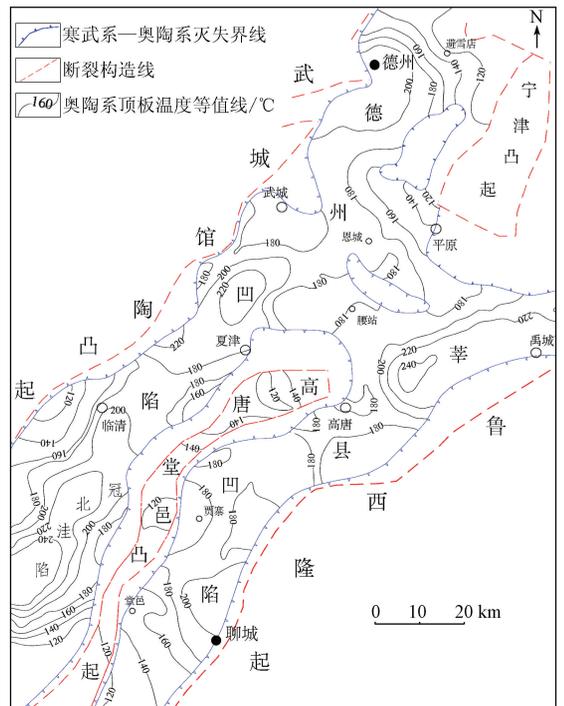


图 6 奥陶系顶板地层温度等值线图

Fig.6 Contour map of Ordovician roof temperature

3 岩溶热储开发利用前景

研究区内岩溶热储温度高,可用于发电,替代对环境污染严重的火力发电厂。目前地热发电技术基本成熟^[20-22],热水型地热发电方式主要有闪蒸式和双循环式2种。其中常用的闪蒸式地热发电系统要求地热井输出的汽水混合物温度在150℃以上;双循环式地热发电温度从经济角度考虑不低于120℃^[23]。本次计算热资源量时根据热储顶板处温度>120℃进行分区,计算公式根据发电用地热资源最低温度90℃^[24]对规范推荐的热储法进行修订(即温差计算时下限温度取90℃),结果表明,可用于发电的地热资源量为 1.27×10^{15} MJ,按30 a进行换算,合计热能为 1.35×10^6 MW,采用10%的热电转换效率进行电能估算为 1.35×10^5 MW(表1)。据统计,区内聊城市与德州市2015年总用电量为492亿千瓦时,约5 616 MW,仅开发利用热储顶板温度大于240℃的高温区的地热资源就能基本满足需求。

表1 岩溶热储资源量及发电能力

Tab.1 Karst thermal storage resources and generation capacity

温度/℃	面积/km ²	资源量/ (10 ¹³ MJ)	热能/ (10 ⁴ MW)	电能/ (10 ³ MW)
>240	125.68	6.39	6.75	6.75
220~240	495.03	21.80	23.00	23.00
200~220	854.56	31.80	33.70	33.70
180~200	1 666.60	42.30	44.80	44.80
160~180	883.12	17.50	18.40	18.40
140~160	473.33	5.35	5.65	5.65
120~140	641.08	2.17	2.30	2.30
合计	5 139.40	127.00	135.00	135.00

4 结论

(1)山东省临清拗陷区寒武系—奥陶系为一套碳酸盐岩建造,岩性主要为灰岩、白云质灰岩、白云岩及泥灰岩等可溶性岩石,具备有利于地热开发的天然裂隙。

(2)寒武系—奥陶系顶板埋深平均为6 000 m左右,在洼陷区埋深大,凸起区埋深小。推测洼陷区奥陶系顶板处地层温度180~240℃;凸起区地层温度120~140℃。

(3)区内岩溶热储地热资源开发利用前景广阔,可用于发电的地热资源量为 1.27×10^{15} MJ,折

合电能 1.35×10^5 MW,其中顶板处地层温度大于240℃的高温区的地热资源量为6 750 MW,能满足区内供电需求。

参考文献:

[1] 杨吉龙,胡克. 干热岩(HDR)资源研究与开发技术综述[J]. 世界地质,2001,20(1):43-51.

[2] Massachusetts Institute of Technology. The future of geothermal energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in 21st Century [M]. Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2006: 13-16.

[3] 汪集旻,胡圣标,庞忠和,等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报,2012,30(32):25-31.

[4] Lowry T S, Foris A, Finger J T, et al. Implications of drilling technology improvements on the availability of exploitable EGS resources [C]//Proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California: Stanford University, 2017.

[5] 李德威,王焰新. 干热岩地热能研究与开发的若干重大问题[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2015,40(11):1858-1869.

[6] 王明健,何登发,张运波,等. 临清拗陷东部构造样式及其形成演化[J]. 大庆石油学院学报,2012,36(3):25-30.

[7] 冯有良,陈景达. 临清拗陷东部中、新生代构造演化特征[J]. 复式油气田,1997(2):50-55.

[8] 宋明春. 山东省大地构造格局和地质构造演化[D]. 北京:中国地质科学院,2008:190-193.

[9] 漆家福,于福生,陆克政,等. 渤海湾地区的中生代盆地构造概论[J]. 地质前缘,2003,10(增刊1):199-206.

[10] 赵鹏大,宋国奇,吴冲龙. 临清拗陷东部构造演化和地热史研究[R]. 东营:胜利油田科研报告,2002:10-16.

[11] 冯超臣,黄文峰. 山东省菏泽市聊城—兰考断裂带西部地区地热资源评价[J]. 中国地质调查,2015,2(8):55-59.

[12] 徐军祥,康凤新,赵季初,等. 山东省地热资源[M]. 北京:地质出版社,2014.

[13] 马晓东,陆荣莉,周长祥,等. 山东聊城西部地热田地热地质特征[J]. 山东国土资源,2007,23(6/7):24-28.

[14] 王奎峰,母国妍,赵群. 临清市区地热资源特征及开发探讨[J]. 地质调查与研究,2007,30(3):224-229.

[15] 颜世强,刘桂仪,孟庆峰,等. 德州市地热资源及开发利用[J]. 山东地质,2001,17(2):48-52.

[16] 吕希学. 渤海湾盆地临清拗陷东部热演化历史和成烃史[J]. 地质科学,2006,41(4):676-687.

[17] 张存霞. 临清拗陷东部地区地层格架及展布特征[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2008.

[18] 李德生,刘友元. 中国深埋古岩溶[J]. 地理科学,1991,11(3):234-243.

[19] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京:科学出版社,1988:126-129.

[20] 李志茂,朱彤. 世界地热发电现状[J]. 太阳能,2007(8):10-14.

- [21] 郑克桢,潘小平. 中国地热发电开发现状与前景[J]. 中外能源,2009,14(2):45-48.
- [22] 罗承先. 世界地热发电开发新动向[J]. 中外能源,2016,21(5):21-28.
- [23] 宋寅. 浅谈地热发电[J]. 技术研发,2016,23(4):118.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

Geothermal energy potential analysis of karst reservoir in Linqing depression of Shandong Province

TAN Zhirong¹, KANG Fengxin^{2,3}

(1. Shandong Lubei Geological Engineering Investigation Institute, Dezhou 253072, China; 2. Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Jinan 250013, China; 3. Shandong Provincial Research Center of Geological Survey Engineering Technology, Jinan 250013, China)

Abstract: There are thick carbonate strata of Cambrian – Ordovician buried at Linqing depression in Shandong Province, which are a favorable target for geothermal exploitation. Based on the seismic interpretation and drilling results obtained during petroleum exploration, and by comprehensively analyzing the results of previous studies, the authors compiled the average geothermal gradient map of Cenozoic and the contour map of Ordovician burying depth, and adopted temperature gradient estimation formula for the strata temperature calculation of Ordovician roof. Combined with the Cambrian – Ordovician strata thickness distribution, and using the temperature of 120 °C at the Ordovician roof as the beginning temperature and 90 °C as the lowest temperature, the authors predicted the prospect of geothermal power generation. The results show that the geothermal resources in the karst reservoir are really prospective, and the total heat resource that can be used for geothermal power plant is 1.27×10^{15} MJ, which is equivalent to 1.35×10^5 MW of electricity power. And the heat resource contained in the 240 °C high temperature area can meet the requirements of power supply in this region.

Key words: karst geothermal reservoir; geothermal resources; geothermal gradient; geothermal power plant
(责任编辑: 常艳)