

·油气地质·

济阳拗陷东营组—馆陶组地热资源评价

赵铭海¹, 李晓燕², 宋明水¹, 杨永红², 郝凤琨², 黄蓉²

(1.中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257001; 2.中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 地热资源属于可再生的清洁能源, 对促进节能减排和绿色低碳具有重要意义。在济阳拗陷区域地质特征分析的基础上, 通过热储分布特征和地温场分布特征的研究, 将东营组—馆陶组下段热储划分为12个快速热补型、26个中速热补型及33个慢速热补型地热单元; 并结合压力场和水化学场的综合分析, 建立了热储概念模型, 东营组—馆陶组下段三角洲、辫状河砂体形成热储, 在明化镇组—第四系巨厚泥岩和松散沉积隔热层的遮挡下, 断陷盆地演化过程中形成的壳幔热流沿基岩向热储传导并存储, 该热储无地表径流和大气水渗入, 无层间越流向外放热, 属无限承压水平二维流。选取热储法进行资源量计算, 计算结果表明, 济阳拗陷东营组—馆陶组下段地热资源量为 419.18×10^9 GJ, 相当于143.12亿吨标准煤, 可采地热资源量为 104.8×10^9 GJ, 相当于35.8亿吨标准煤。

关键词: 热储 地温场 地热单元 资源量 济阳拗陷

中图分类号: TE122.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)04-0001-05

Research on geothermal resources assessment of the Guantao-Dongying Formation in Jiyang depression

Zhao Minghai¹, Li Xiaoyan², Song Mingshui¹, Yang Yonghong², Xi Fengkun², Huang Rong²

(1. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257001, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: Geothermal resource is a kind of renewable clean energy which is significant to promote energy-saving and emission-reduction and green and low carbon. On the basis of regional geological characteristics analysis and the research on geothermal reservoir and geothermal field, the geothermal reservoirs of the Dongying Formation and the lower Guantao Formation in Jiyang depression were divided into 12 geothermal units as quick heat supply type, 26 geothermal units as moderate-speed heat supply type and 33 geothermal units as low-speed heat supply type. The geothermal reservoir conceptual model was set up combining with comprehensive analysis of pressure and hydrochemical field. The geothermal reservoirs develop in deltas and braided rivers of the Dongying Formation and the lower Guantao Formation. The crust mantle heat flow, formed during the evolution of faulted basin, conducts to the upper geothermal reservoirs and is stored along bedrock under the blocking of thick mudstones and loose insulating layers developing in the Minghuazhen-Quaternary Formation. There is no surface seepage or air infiltration in the geothermal reservoirs. And it is infinite confined horizontal two-dimensional flow without inter layer leakage flow for outward heat leaking. The heat storage method was selected to calculate the resource and the results show that the geothermal resources of the lower Guantao Formation and the Dongying Formation are 419.18×10^9 GJ, which amount to 143.12 million tons of standard coal. The recoverable geothermal resources are 104.8×10^9 GJ, which amount to 35.8 million tons of standard coal.

Key words: geothermal reservoir; geothermal field; geothermal units; resources; Jiyang depression

对于成熟探区, 随着油气勘探程度的不断提高, 油气勘探难度越来越大, 除深化勘探寻找新的

含油气区块之外, 开发利用地热资源是寻找替代能源的一条重要途径。地热资源属于可再生的清洁

收稿日期: 2015-05-21。

作者简介: 赵铭海(1964—), 男, 山东莱西人, 教授级高级工程师, 从事油气勘探及地球物理研究。联系电话: (0546)8715448, E-mail: zhaominghai.slyt@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科研攻关项目“济阳拗陷及邻区地热资源评价与选区研究”(P13017)。

能源,对促进节能减排和绿色低碳具有重要意义。国家已将地热能列入可再生能源低成本规模化开发利用的优先主题,中国石化也已把地热资源作为绿色能源列入“十二五”发展规划。胜利油区地处渤海湾盆地济阳拗陷,地热资源十分丰富,具有开发利用地热资源的先天优势,油田生产和生活较大的用热量需求也迫切需要地热资源的开发利用,但目前对于济阳拗陷地热资源的潜力还不明确。笔者通过对济阳拗陷热储结构、地温场等地热地质特征开展研究,获取砂岩厚度、孔隙度、热储温度等评价参数,并结合水化学场及压力场的分析,建立热储概念模型,进行地热资源评价,以期为油田大力推进的地热工程项目提供技术支持和理论指导,从而服务于国家和中国石化的绿色能源战略。

1 区域地质特征

济阳拗陷位于渤海湾盆地的西南部,是在华北地台基础上发育而成的中、新生代叠合盆地;新生代以来,济阳拗陷经历了裂陷期、断陷期、拗陷期等不同的构造演化阶段,形成了厚层的碎屑岩沉积,包括古近纪断陷期和新近纪拗陷期2个构造层^[1-2]。就断裂构造而言,古近纪以来济阳拗陷主要表现为多组新断层的形成和老断层的消亡及转换,新断层走向以NE及ENE向为主,多组断层在平面上按多种方式组合形成复式断层,将济阳拗陷切割成大小、形态各异的多个断块体,并控制沉积、沉降,最终在东营、沾化、惠民、车镇凹陷内形成了多个小洼陷^[3-5]。古近纪末期,济阳拗陷南部东营凹陷控凹边界断层基本停止活动,在凹陷内部沉积层中发育了大量浅层断层,使凹陷内部的沉降—沉积中心发生分散,断陷鼎盛时期凸洼相间的构造格局被破

坏,地势相对平坦,此时济阳拗陷的沉降中心已经由南部各凹陷迁移至沾化—埕岛地区,再加上鲁西隆起东南部受走滑推挤而抬升形成剥蚀区,古近纪末期济阳拗陷东部的构造形态已不同于断陷鼎盛时期北断南超的箕状形态,整体表现为由南向北至渤中凹陷倾斜的单斜式构造,这种构造格局一直持续至新近纪馆陶组沉积时期。

2 热储分布特征

受东营组沉积时期鲁西等周边隆起抬升、渤海湾盆地沉积中心向渤海海域迁移等因素的控制,济阳拗陷东部在东营组沉积时期形成了整体由南向北不断推进的济阳三角洲沉积体系,之后地层抬升遭受剥蚀,进入馆陶组拗陷沉积时期,整体形成了沉积基准面不断上升的冲积扇—辫状河—曲流河沉积体系。研究区东营组和馆陶组大型辫状河—三角洲沉积砂体埋深浅、孔渗性好、有效盖层厚,是较好的热储。由于东营组和馆陶组内部的热储类型不均一,为更好地进行资源评价,对东营组和馆陶组进行分段评价。综合利用岩心、录井、测井、地震等资料,根据基准面沉积旋回,将东营组划分为东三段、东二段和东一段,馆陶组划分为馆下段和馆上段。馆上段以曲流河沉积为主,泛滥平原相泥岩发育,砂体分布连续性差,不能作为有效热储。东一段—馆下段及拗陷南部东二段以辫状河沉积为主,拗陷北部东三段及东二段发育三角洲沉积(图1)。热储以东三段—东一段三角洲和辫状河砂体、馆下段辫状河道砂体为主。东三段—东一段热储南薄北厚,馆下段在整个研究区均有分布,厚度大于100 m,受古地貌控制,仍表现出南薄北厚的沉积特征。

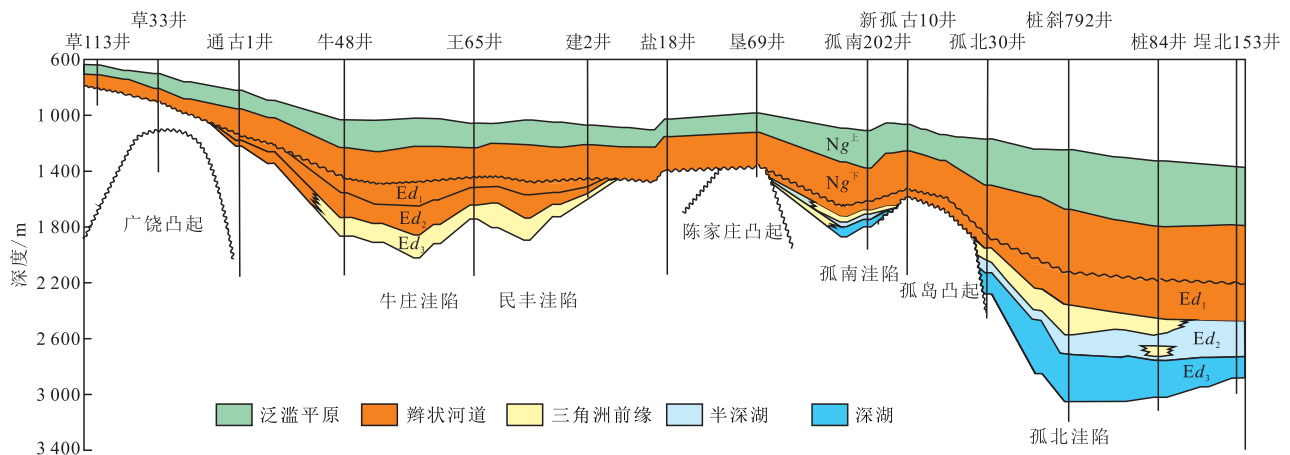


图1 济阳拗陷东部草113—埕北153井沉积体系分布

Fig.1 Depositional system distribution of Well Cao113—Chengbei153 in eastern Jiyang depression

在沉积体系分析的基础上,通过单井砂岩厚度统计,明确了济阳拗陷砂岩厚度分布特征。从残留地层厚度来看,受沉积体系的控制,由鲁西—广饶凸起、垦东凸起向北沿物源方向发育三角洲及辫状河道砂岩沉积中心,受古地貌及凸起区—凹陷区抬

升剥蚀程度差异的影响,济阳拗陷东部砂岩沉积表现为洼陷区较厚、边缘凸起区较薄,西部惠民、车镇凹陷砂岩厚度较大区域沿控凹断层继承性展布(图2)。总体来看,热储物性条件较好,砂岩孔隙度为15%~30%,大部分地区砂岩孔隙度大于20%。

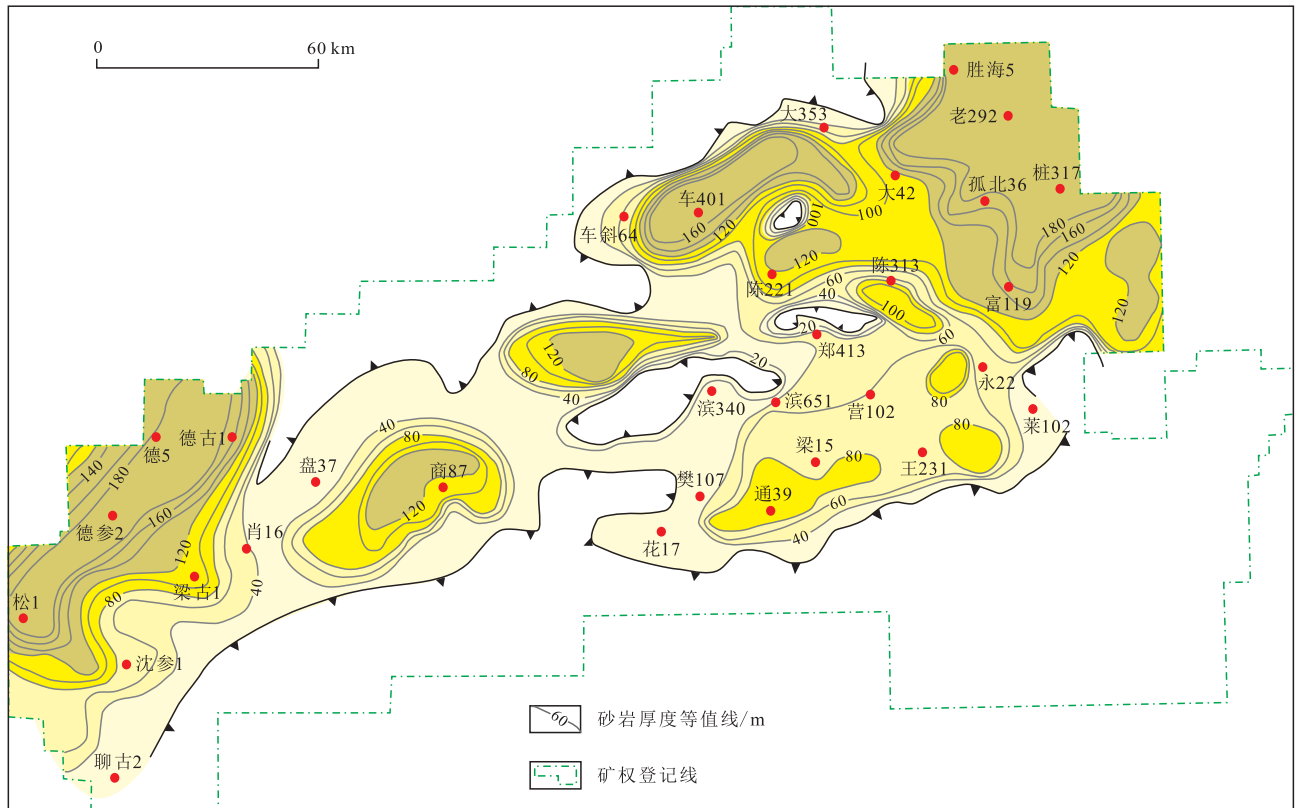


图2 济阳拗陷馆下段砂岩厚度等值线

Fig.2 Thickness contour of the sandstone in the lower Guantao Formation in Jiyang depression

3 地温场特征及地热单元划分

3.1 地温场特征

地温场可用地温梯度表征,中国规定地温梯度超过3.5℃/hm为地热异常^[6]。利用油气勘探过程中取得的地质测试、试油测温等数据计算各测温井点地温梯度,明确了济阳拗陷地温梯度平面分布特征(图3)。总体来看,济阳拗陷地温梯度为3.4~4.2℃/hm,大部分地区属于地温异常区,地温梯度大于4.0℃/hm的区域主要分布于鲁西隆起及各个凸起区,洼陷区地温梯度较低,表明热储距离基岩越近,地温梯度越大,地热异常越明显。研究区构造控热特征明显,地热异常应属基岩传导型。

3.2 地热单元划分

从地温梯度分布来看,不同构造带具有明显的差异,这是由于地层的热导率不同导致的,根据本次研究的取样测试结果,结合国标经验值(花岗岩

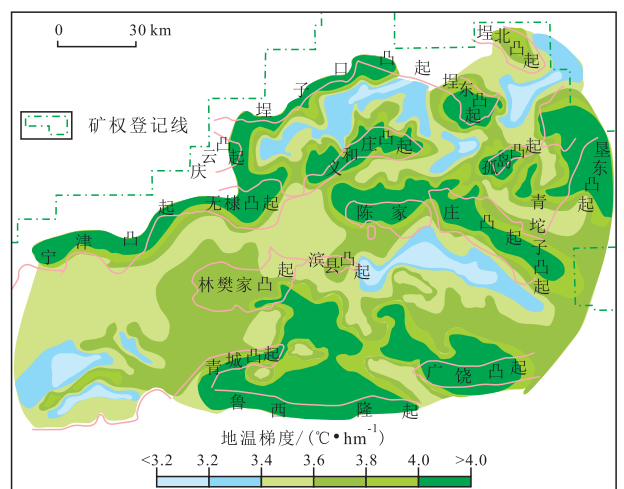


图3 济阳拗陷地温梯度平面分布特征

Fig.3 Geothermal gradient distribution in Jiyang depression

热导率为2.721 W/m·K^[7],以花岗岩为主的基岩地层热导率最高,古近系孔店组—沙河街组热导率较低;因此直接覆盖在基岩上的碎屑岩热储受下部以太古界为主的基岩地层热传导率较高的影响,大地

热流补充较快,地温梯度较高;洼陷区由于沿基岩传导至东营组—馆陶组热储的热能受热传导性较差的孔店组—沙河街组的阻隔从而地温梯度较低(表1)。

表1 不同岩性岩石热导率统计
Table1 Statistics of thermal conductivity of different rock types

| 样品 | 层位 | 岩性 | 热导率/(W·m ⁻¹ ·K) |
|------|------|-----|----------------------------|
| 埕北32 | 东营组 | 粗砂岩 | 1.451 |
| 富111 | 东营组 | 细砂岩 | 1.452 |
| 田9 | 东营组 | 粉砂岩 | 1.833 |
| 牛117 | 沙河街组 | 砂岩 | 2.462 |
| 牛117 | 沙河街组 | 泥岩 | 2.146 |

根据热储下伏地层(基岩与新生代地层)的展

布特征,划分出慢速热补型、中速热补型和快速热补型3种地热单元类型。其中快速热补型下伏地层为前古近系基岩,深部热源直接通过基岩传导,速度最快;中速热补型地热单元与前古近系基岩之间的地层厚度为20~500 m,深部热源传导速度中等,大地热流值中等;慢速热补型地热单元与前古近系基岩之间的地层厚度一般大于500 m,深部热源传导速度较慢,大地热流值较低。一般控洼断层上升盘为中速热补型,下降盘古近系—新近系沉积地层明显增厚,热储与基岩距离明显增大,为慢速热补型。根据以上划分原则,针对东营组和馆下段共划分出12个快速热补型地热单元、26个中速热补型地热单元和33个慢速热补型地热单元(图4)。

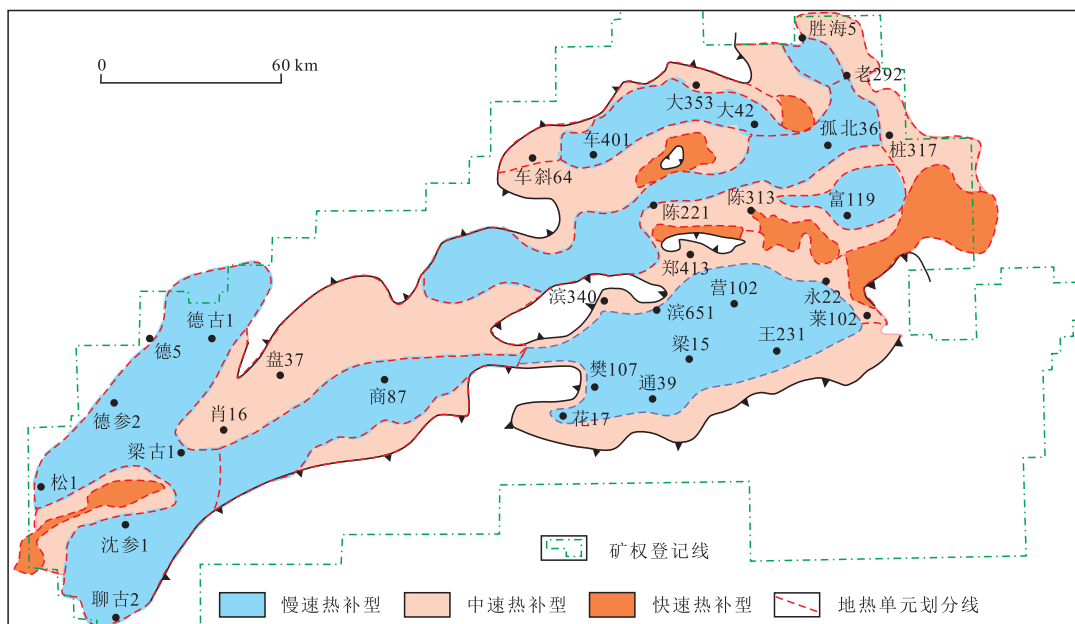


图4 济阳拗陷馆下段地热单元划分

Fig.4 Division of geothermal units in the lower Guantao Formation in Jiyang depression

3.3 压力场和水化学场

通过压力场分析可以明确流体的流动方式。根据研究区测压数据,地层压力系数主要为0.9~1.1,东营组—馆陶组热储整体属于正常压力系统,不存在层间流体对流,为无限常压二维水平流体地热系统。

通过水化学场分析可以明确地热流体的径流条件。研究区地层流体矿化度整体偏高,表明东营组—馆陶组地热流体以沉积埋藏水为主,无地上径流或大气水渗入。

4 热储概念模型

热储概念模型指对地热田热储、盖层、地热成

因、流体运动等要素的综合描述^[8-9],决定了资源量的计算方法。通过对济阳拗陷热储展布、地温场、压力场和水化学场的综合分析,建立了东营组—馆陶组热储概念模型:东营组—馆下段三角洲、辫状河砂体形成热储,在明化镇组—第四系巨厚泥岩和松散沉积隔热层的遮挡下,断陷盆地演化过程中地幔上涌形成的幔源热流沿基岩向热储传导并存储,该热储无地表径流和大气水渗入,无层间越流向外放热,属无限承压水平二维流。

5 地热资源量计算

无限承压水平二维流热储概念模型的资源量可用热储法进行精确的计算^[10-12],计算公式为

$$Q_R = Ad[\rho_c C_c(1-\phi) + \rho_w C_w \phi](t_r - t_j) \quad (1)$$

式中： Q_R 为地热资源量，kcal； A 为面积， m^2 ； d 为砂岩厚度， m ； ρ_c 和 ρ_w 分别为岩石和地层水的密度， kg/m^3 ； C_c 和 C_w 分别为岩石和地层水的比热， $kcal/(kg \cdot ^\circ C)$ ； ϕ 为孔隙度； t_r 为热储温度， $^\circ C$ ； t_j 为基准温度， $^\circ C$ ，按地热利用废弃温度取值为25。

针对面积、砂岩厚度和孔隙度等体积类参数，按各地热单元面积确定面积参数，按照各地热单元内砂岩厚度和孔隙度的加权平均值确定砂岩厚度和孔隙度参数。

热储温度主要受热储地层厚度、埋深和地温梯度的共同影响，地层厚度越大、埋藏越深，储热能力越强，热储温度越高，隆起一凸起区或盆地边缘热储地层厚度较小、埋深浅，温度也较低。热储温度计算式为

$$t_r = t_0 + \frac{(h-h_0)G}{100} \quad (2)$$

式中： t_0 为恒温层温度， $^\circ C$ ，其值为14.75； h 为热储埋深， m ； h_0 为恒温层深度， m ，其值为17.45； G 为地温梯度， $^\circ C/hm$ 。

研究区各套热储温度以50~90 $^\circ C$ 为主，北部埕岛地区大于90 $^\circ C$ ，属于中低温地热资源。

岩石和水的密度按照国标经验值选取；对于岩石比热参数，分别针对东营凹陷、沾化凹陷、东营凹陷南坡、惠民凹陷等地热单元采集岩样进行了比热参数的测试，通过对比，不同类型砂岩的比热参数与国标经验值差别较小，根据实测比热参数值，砂岩比热取值为0.18 kcal/($kg \cdot ^\circ C$)。

通过计算，济阳拗陷东营组—馆下段地热资源量为419.18 $\times 10^9$ GJ，相当于143.12亿吨标准煤，资源潜力巨大。对大型沉积盆地的新生界砂岩，可采资源量一般取热能利用率为25%^[7]，按照地热资源量的25%进行计算，研究区可采地热资源量为104.8 $\times 10^9$ GJ，相当于35.8亿吨标准煤，表明研究区东营组—馆下段地热资源量非常可观。

6 结论

济阳拗陷东营组—馆下段热储以由南向北不断推进的辫状河—三角洲沉积砂体为主，受古地貌及凸起区—凹陷区抬升剥蚀程度不同的影响，济阳拗陷东部砂岩沉积表现为洼陷区较厚、边缘凸起区较薄的特点，西部惠民、车镇凹陷砂岩厚度较大区域沿控凹断层继承性展布。

由于地层的热导率不同，不同构造带地温场具有明显的差异，直接覆盖在基岩上的热储地温梯度较高，洼陷区地温梯度较低；据此根据热储下伏地层展布将济阳拗陷地热单元划分为快速热补型、中速热补型和慢速热补型3种类型，并分别针对东营组—馆下段共划分出12个快速热补型地热单元、26个中速热补型地热单元和33个慢速热补型地热单元。

研究区热储概念模型属无限承压水平二维流，东营组—馆下段三角洲、辫状河砂体形成热储，在明化镇组—第四系巨厚泥岩和松散沉积隔热层的遮挡下，断陷盆地演化过程中地幔上涌形成的幔源热流沿基岩向热储传导并存储，该热储无地表径流和大气水渗入，无层间越流向外放热。

利用热储法计算得到济阳拗陷东营组—馆下段地热资源量为419.18 $\times 10^9$ GJ，相当于143.12亿吨标准煤，可采地热资源量为104.8 $\times 10^9$ GJ，相当于35.8亿吨标准煤。

参考文献：

- [1] 宋国奇,王永诗,程付启,等.济阳拗陷古近系二级层序界面厘定及其石油地质意义[J].油气地质与采收率,2014,21(5):1-7.
Song Guoqi, Wang Yongshi, Cheng Fuqi, et al. Ascertaining secondary-order sequence of Palaeogene in Jiyang depression and its petroleum geological significance [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 1-7.
- [2] 曹忠祥,李友强.济阳拗陷“十一五”期间探井钻探效果及对策分析[J].油气地质与采收率,2013,20(6):1-5.
Cao Zhongxiang, Li Youqiang. Drilling result of exploration wells and analysis on measures for Jiyang depression during the “11th Five-Year” [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 1-5.
- [3] 宋国奇,郝雪峰,刘克奇.箕状断陷盆地形成机制、沉积体系与成藏规律——以济阳拗陷为例[J].石油与天然气地质,2014,35(3):303-310.
Song Guoqi, Hao Xuefeng, Liu Keqi. Tectonic evolution, sedimentary system and petroleum distribution patterns in dustpan-shaped rift basin: a case study from Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 303-310.
- [4] 吉双文,燕子杰,姜能栋.渤海湾盆地构造及沉积演化探讨——以济阳拗陷为例[J].石油地质与工程,2008,22(3):21-25.
Ji Shuangwen, Yan Zijie, Jiang Nengdong. Discuss on tectonic and sedimentary evolutions of Bohaiwan basin: taking Jiyang sag as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(3): 21-25.
- [5] 黄超.济阳拗陷断层聚集带划分及断块油藏分布规律[J].特种油气藏,2013,20(6):59-62.

(下转第13页)