

doi: 10.12029/gc20190204

张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2): 255-268.

Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 46(2): 255-268(in Chinese with English abstract).

中国沉积盆地型地热资源特征

张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼

中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061

摘要: 地热资源作为一种可再生清洁能源, 对可持续发展有着重要的意义。本文通过分析中国沉积盆地型地热资源特点, 对主要热储层分布进行了论述, 并在此基础上对不同热储的水化学特征进行了总结, 评价了我国主要沉积盆地型地热资源潜力。沉积盆地型地热资源主要为中低温地热资源, 是中国水热型地热资源的主要类型, 约占水热型地热资源总量的 89%, 具有储集空间广、厚度大, 地热资源热储类型多、储量大, 赋存中低温地热水, 资源可利用程度高等特点。沉积盆地型地下热水水化学类型一般由补给区 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 型等低矿化水, 逐渐过渡为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型, 最终到排泄区或封闭状态下变为 Cl-Na 型等高矿化水。沉积盆地中热盆地地热资源储量较大, 占到主要沉积盆地总储量的 54%, 地热资源可开采量占到主要沉积盆地总可开采量的 59%, 温盆地地热资源储量占到 42%, 可开采量占到 40%, 冷盆地地热资源储量仅占到 4%, 可开采量占到 1%。应进一步加强地热资源勘查工作; 积极开展地热资源回灌, 保证可持续开发利用; 推进地热资源梯级综合利用; 建立地热资源监测网。

关键词: 地热资源; 地温场; 水化学; 资源潜力

中图分类号: P314.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)02-0255-14

Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins

ZHANG Wei, WANG Guiling, LIU Feng, XING Linxiao, LI Man

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

Abstract: As a renewable clean energy, geothermal resources play an important role in sustainable development. As the sedimentary basin type geothermal resources are mostly distributed in the population gathering areas such as the plain basin, it is important to study the geothermal resources of the sedimentary basin. Based on the analysis of geothermal reservoir distribution and hydrochemical characteristics of sedimentary basins in China, the authors evaluated the geothermal resources of sedimentary basins. The geothermal resources of sedimentary basins are mainly medium and low temperature geothermal resources, and they constitute the main type of geothermal resources in China, accounting for 89% of the total geothermal resources. Moreover, they have the characteristics of wide reservoir space, large thickness, abundant types of geothermal resources, large reserves of geothermal resources, medium and low temperature geothermal water and high availability of resources. The chemical types of geothermal

收稿日期: 2018-07-19; 改回日期: 2019-01-07

基金项目: 中国地质调查局项目(12120113077500), 中国地质科学院基本科研业务费项目(JYYWF20181101)和国家自然科学基金青年基金项目(41502249)联合资助。

作者简介: 张薇, 女, 1981 年生, 硕士生, 高级工程师, 主要从事地地质调查评价工作; E-mail: 18879003@qq.com。

通讯作者: 王贵玲, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 主要从事热资源评价、深部地热开发等方面工作; E-mail: guilingw@163.com。

water in sedimentary basin type generally change from low-mineralized water such as $\text{HCO}_3\text{-Na}$ and $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ through $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$ type and to high-mineralized water such as Cl-Na type in drainage area or closure state. The salinity increases from shallow to deep part as well. The thermal resources in thermal basins account for 54% of the total reserves in major sedimentary basins, 59% of the total recoverable reserves in major sedimentary basins, 42% in warm basins, 40% in recoverable reserves, 4% in cold basins and 1% in recoverable reserves. Therefore, geothermal resources exploration should be further strengthened, geothermal resources recharge should be actively carried out to ensure sustainable development and utilization, geothermal resources comprehensive utilization should be promoted, and geothermal resources monitoring network should be established.

Key words: geothermal resources; geothermal field; hydrochemistry; resource potential

About the first author: ZHANG Wei, female, born in 1981, master candidate, senior engineer, majors in geothermal geological survey and evaluation; E-mail: 18879003@qq.com.

About the corresponding author: WANG Guiling, male, Doctor, senior researcher, research interests include geothermal resources evaluation biomedical processing, utilization of geothermal water resources at deep crust; E-mail: guilingw@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. 12120113077500), basic research fees of the Chinese Academy of Geological Sciences (No. JYYWF20181101) and National Natural Science Foundation of China (No. 41502249).

1 引 言

地热资源是可再生能源家族的重要成员,具有丰富的资源潜力,利用系数高,生命周期二氧化碳排放低,潜在的低成本优势。地热资源对于未来能源供应与节能减排的巨大潜力,受到了世界各国高度认同与重视。

世界上许多国家完成了地热资源调查评价工作,日本自1957—1977年曾4次对本国的中低温热水资源和超深度高温热流体资源作了勘查评价(李录娟,2011);美国在1975年和1978年公布了“726”和“790”通报(White and Williams, 1975;Muffler, 1979),详细介绍了美国地热资源评价成果,1982年又公布了“892”通报,专门介绍低温地热资源评价报告(Reed,1983)。美国地质调查局(Williams, 2008)评价了已探明的241个中高温地热区所在的美国西部13个州的地热潜力;韩国通过1560个热特性数据,353个热流数据,54个地表温度数据和180个产热数据分析了韩国的地热能和等温线图(Lee et al., 2010);萨尔瓦多在1988年就对本国的温泉、地热井等地热资源进行了初步评估,鉴定和描述了70个地热活动区(Campos, 1988);波兰在2015年绘制出版了地热水和能源资源图集,展现了地热资源现状(Sowizdzal, 2018)。

中国在20世纪70年代完成了20多个省区地热资源普查工作(梁增寿等, 1975;杨见松, 1985);近年来,又先后开展了宁夏银川平原、北京市城区、陕西关

中盆地、鲁北等地区地热资源勘查评价工作(王利, 2006;增瑞祥等2007;刘方等, 2009);并于2015年全面完成了31个省(市)的地热资源调查评价工作(王贵玲等, 2015),并针对京津冀等重点地区完成了地热资源成因模式和潜力研究(王贵玲, 2017)。

中国地热能资源分布具有明显的规律性和地带性,但受构造、岩浆活动、地层岩性、水文地质条件等因素的控制,总体分布不均匀。分布在地带断裂带上的地热资源一般规模较小,主要分布于中国的东南沿海、台湾、藏南、川西、滇西和胶辽半岛等地区,包括中低温地热资源和高温地热资源。分布在盆地特别是大型沉积盆地的地热资源储量大,是地热资源开发潜力最大的地区,约占我国目前可开发利用水热型地热资源的89%。主要分布于我国的东部华北平原、江淮平原、松辽盆地和环鄂尔多斯断陷盆地等地区,均为中低温地热资源。

2 沉积盆地地热资源特点

中国有盆地392个,总面积400万 km^2 。其中大型盆地(面积大于5万 km^2)有9个,中型(1~5万 km^2)盆地有39个,其余多为小型的山间盆地(田廷山等, 2006)。主要的沉积盆地有华北平原、河淮平原、松嫩平原、四川盆地、鄂尔多斯盆地、苏北盆地、江汉盆地、准噶尔盆地与塔里木盆地等(图1),盆地地热资源存在东西差异,分布受大地构造环境的控制。

2.1 储集空间广、厚度大

沉积盆地区有利于地下热水的形成与赋存,大

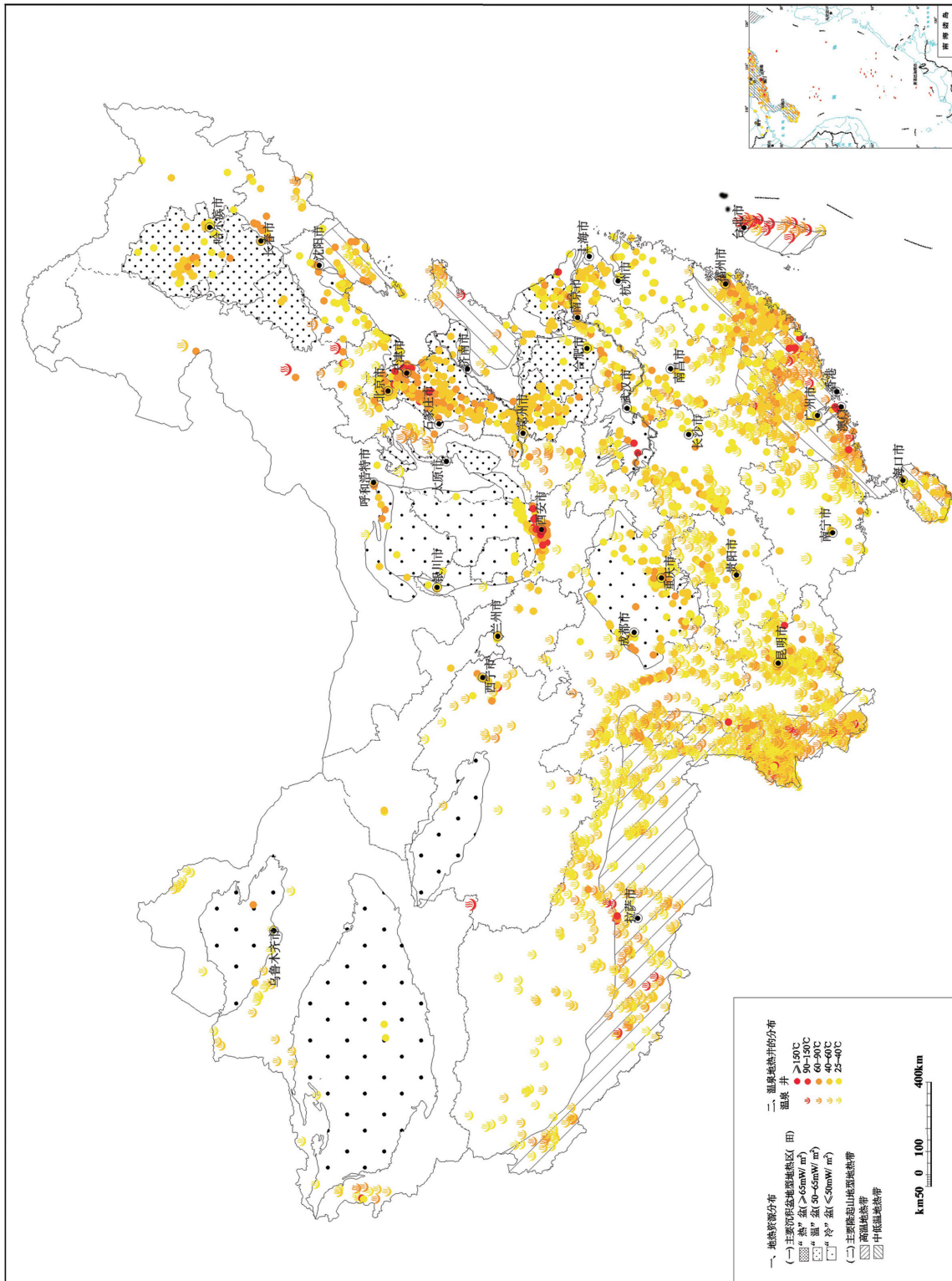


图1 我国地热资源分布
Fig.1 Distribution of geothermal resources in China

型、特大型沉积盆地的沉积层厚度大,其中既有由粗碎屑物质组成的高孔隙、高渗透性的储集层,又有由细粒物质组成的隔热、隔水层,起着积热保温的作用(陈墨香等,1998)。大型沉积盆地是区域水的汇集区,具有利于热水集存的水动力环境,使进入盆地的地下水流可完全吸收岩层的热量而增温,在盆地的地下水径流滞缓带,成为地热水赋存的理想环境,也是开发利用地热水资源的有利地段,尤其是在沉积物厚度大、深部又有粗碎屑沉积层分布的地区,如华北、松辽等大型沉积盆地的中部。

2.2 地热资源热储类型多

沉积盆地上部一般分布着孔隙型热储,岩性一般为第四系松散岩类、新近系和古近系砂岩以及中生界沉积岩。裂隙型热储主要分布于沉积盆地下部,一般为沉积岩、变质岩、花岗岩和火山岩。盆地基底隐伏有碳酸盐岩的地区,分布有岩溶型热储。我国中、新元古代和早古生代碳酸盐岩地层沉积厚度大,层位稳定、分布广泛,岩溶裂隙发育,水的连通性较好,盆地内的隐伏碳酸盐岩与盆地周边的同类岩层有构造上联系和一定的水力联系,是周边碳酸盐岩裂隙岩溶水的汇流排泄地段或滞流区。

2.3 地热资源储量大

沉积盆地型地热资源,特别是大型沉积盆地的热储温度随深度增加,地热资源储量大(姜建军等,2005)。中国水热型地热资源储量折合标准煤1.25万亿t,可开采量折合标准煤19亿t,其中主要沉积盆地地热资源储量折合标准煤1.06万亿t,占全国总量的85%,可开采量折合标准煤17亿t,占全国总量的89%(王贵玲等,2017)。

2.4 赋存中低温地热水

大地热流是沉积盆地热储层的供热源,区域热流背景值的大小,对盆地地热水的聚存有重要的、决定性的作用。中国主要沉积盆地的大地热流背景值,尽管有所差别,但均属正常值范围,介于40~75 mW/m²(姜光政等,2016),这就决定了在有限的深度内(3000 m),不具有高温地热资源形成的条件。低温背景值,决定了盆地一般只赋存低温地热水(小于90℃)(张金华等,2011),部分为中温(90~150℃)的地热水资源。

2.5 资源可利用程度高

中低温热水在全国正以强劲势头向规模化、产

业化方向健康发展,中国的地热直接利用水平已居世界之首。沉积盆地地热资源资源利用方式多样,如地热供暖、医疗保健、温泉洗浴、水产养殖和农业灌溉等。已开发利用的地热田中,全部或部分用于洗浴的估计占热田总数的60%以上,占地热资源直接利用的18%;随着全球环境保护意识的增强,加大了以地热供暖为主的开发力度,到2014年底地热供暖比例为19%,首次超过温泉洗浴(戴宝华,2017)。

3 地温场与热储分布特征

3.1 地温场分布特征

3.1.1 大地热流值

大地热流是一个综合参数,是地球内热在地表可直接测得唯一的物理量,它比其他地热单项参数(温度、地温梯度)更能反映一个地区地热场的基本特点(陈墨香等,1994)。一般来说,构造活动越强烈或构造-热事件年龄越小的地区,大地热流值越高;构造稳定的古老块体大地热流值较低。沉积盆地基岩面的起伏形成基底隆起和凹陷格局,对区域地温场和地表热流的分布起着控制作用,使得基底隆起区的大地热流值大于凹陷区的大地热流值。

中国沉积盆地大地热流分布很不均匀,总体分布格局表现为东高、中低,西南高、西北低(姜光正等,2016)。具体来看,西藏南部分地区、厦门部分地区热流值最高,平均值为100~150 mW/m²。其次为西藏北部、鄂尔多斯盆地、四川盆地、南方沿海盆地,东部的华北南部、松辽盆地北部、苏北等地,平均值在55~80 mW/m²,其次为新疆的塔里木盆地、准噶尔盆地、四川盆地北部以及北部松辽盆地北部与等,其平均值为30~50 mW/m²。

根据大地热流值分布,将小于50 mW/m²的沉积盆地划为冷盆,50~65 mW/m²的为温盆,大于65 mW/m²的为热盆。热盆主要位于中国东部地区,如松辽盆地、下辽河盆地、华北平原、苏北盆地、河淮盆地和汾渭盆地,大地热流值相对较高,大部分在65~75 mW/m²,最高值均高于75 mW/m²,其中汾渭盆地的中部,即山西和陕西的交界处大地热流值最高,而松辽盆地北部小部分地区、汾渭盆地北部小部分地区以及河淮盆地西部大地热流值小于65 mW/m²。温盆主要位于中国中部地区,如江汉盆

地、河套平原、银川平原、鄂尔多斯盆地、四川盆地及西宁盆地,这些盆地大地热流值变化幅度较小,一般在 $50 \sim 65 \text{ mW/m}^2$,仅在鄂尔多斯盆地东南部的小范围内出现了 $65 \sim 70 \text{ mW/m}^2$ 的大地热流值,在江汉盆地东部小范围和四川盆地西北部小范围地区出现 $45 \sim 50 \text{ mW/m}^2$ 的大地热流值;准噶尔盆地、塔里木盆地和柴达木盆地等冷盆位于我国西部,大地热流值较小,大部分位于 $35 \sim 50 \text{ mW/m}^2$,仅在塔里木盆地塔克拉玛干沙漠中部和柴达木盆地西部出现 $50 \sim 60 \text{ mW/m}^2$ 的大地热流值。

3.1.2 地温场

地温场是反映盆地热动力系统的重要标志,地温场空间分布的不均一性,是中国沉积盆地复杂性的特征之一。地温场的形成受各种复杂的地质与水文地质条件控制,主要控制因素为地质构造、基地起伏、岩浆活动、岩性、盖层褶皱、断层、地下水活动及烃类聚焦等(任战利,1999)。地温梯度是指一定深度地层地温之差与深度之比,是反映该地区地层地热特性的重要参数之一。

在水平方向,我国主要沉积盆地中,地温梯度值多在 $1.5 \sim 4.0^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ (王贵玲等,2011),地温梯度最高值主要分布在华北平原(南部)、河淮盆地西部、苏北盆地、松辽盆地中部、下辽河盆地靠近辽东丘陵地区、汾渭盆地大部、江汉盆地和河套平原,其值多在 $3.0 \sim 4.5^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,最高可达 $6.0 \sim 7.0^\circ\text{C}/100 \text{ m}$;最低值位于塔里木盆地、准噶尔盆地部分地区、四川盆地西北地区和银川平原西南部盆地边缘,其值低于 $2.0^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。一般盆地在发育的主要时期,地温梯度总体较高,都大于 $3.5 \sim 4.0^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,但多数沉积盆地现今的地热场较低,地温梯度均小于 $4.0^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,多数盆地小于 $3.0^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ 。

在垂直方向,地温的垂向变化除受地层岩性控制外,还受基底构造的控制,中、新生界的盖层,在隆起区其垂向增温较快、温度较高,在台陷、断凹区则增温较慢、地温也相对较低。此外,垂向上的盖层地温梯度、基岩热储温度还与基岩埋深有关。盖层地温梯度值随着基岩顶面埋深的加大而逐渐减小,而基岩热储温度随基岩顶面埋深加大而逐渐增大。我国主要沉积盆地地温垂向变化可看出热盆各层深度上的地温普遍高于其他盆地。

3.2 热储分布特征

沉积盆地热储层主要可分为砂岩孔隙型热储与基岩岩溶裂隙热储两大类型。砂岩孔隙型热储多为新生界沉积层沉积而来,一般埋藏较浅、温度较低,多形成大面积的地热赋存区。基岩热储被新生界沉积层掩盖,有利于储集层的聚热和保温,温度相对较高。

盆地地热资源存在东西差异。东部地区的华北、苏北,软流圈上拱地壳变薄,沉积巨厚,发育多层叠置的热储系统,主要热储层是新生界砂岩孔隙型热储和古生界与中新元古界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储。中部四川、鄂尔多斯等盆地,地壳总体较厚,主要热储层是中生界砂岩孔隙型热储和古生界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储,一般为低温热水,深凹陷地带赋存中温热卤水。西部包括塔里木、柴达木、准噶尔等盆地,地壳厚,盆地热流值低,主要热储层是古近系砂砾孔隙型热储和古生界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储,一般矿化度较高,常为卤水。北部主要为松辽盆地、下辽河盆地,地壳较厚,发育多层热储系统,主要的热储层为中新界砂岩孔隙型热储。

在不同盆地中分布的同类型热储的空间分布存在差异,其补给、径流、排泄条件也不同,导致其储水能力及地下热水的水化学特征等存在显著差异。不同盆地热储分布见表1。

3.2.1 新近系—古近系热储

新近系明化镇组、馆陶组,古近系东营组等地层的热储在华北、河淮及下辽河盆地均有分布,是中国华北平原及河淮盆地地热区的代表性热储层,均属于孔隙型层状热储。除上述3个跨区分布的典型热储层之外,新近系的盐城组、广化寺组、张家坡组、蓝田灞河组、冷水沟—寇家村组、红河组、干河沟组、红柳沟组、油砂山组、干柴沟组等地层的热储,以及古近系的沙河街组、三垛组、戴南组、沙市组、新沟嘴组、荆沙组、潜江组、荆河镇组、白鹿塬组、清水营组、路乐河组、红沟组、马哈拉沟组、祁家川组等地层热储只在单一盆地中分布。其中除银川平原的新近系干河沟组、红柳沟组热储,古近系清水营组为裂隙型层状热储,西宁盆地古近系红沟组、马哈拉沟组、祁家川组热储为裂隙孔隙型热储,其余均为孔隙型层状热储,具体见表2。

表 1 中国主要沉积盆地热储分布

Table 1 Reservoir distribution in the main sedimentary basins in China

盆地	热储层					
	新生界	中生界	古生界	新元古界	中元古界	太古界
华北平原	√		√		√	
河淮盆地	√		√			
苏北盆地	√		√			
松辽盆地		√				
下辽河盆地	√					
江汉盆地	√	√				
河套平原	√					
汾渭盆地	√	√	√	√	√	√
银川平原	√		√			
四川盆地		√	√	√		
鄂尔多斯盆地		√	√			
准噶尔盆地		√	√			
塔里木盆地	√	√				
柴达木盆地	√					
西宁盆地	√	√	√		√	

该类型热储中,具有代表性的为华北平原新近系明化镇组、新近系馆陶组与古近系东营组热储。华北平原明化镇组热储地层岩性以河流-浅湖相砂岩、泥岩互层为主。热储层由中细砂岩与含砾砂岩构成,一般单层厚度1~5 m,最厚可达数十米,砂岩占地层厚度比例一般在30%左右,有效孔隙度为23%~31%。地热井单井涌水量一般1000~1500 m³/d,热水温度35~50℃,最高可达60℃(张德忠等,2013)。馆陶组岩性颗粒较粗,为河流-浅湖相含砾砂岩,底部普遍发育一层砾岩,该层底砾岩是馆陶组底部的标志层。馆陶组热储层单层厚度为3~13 m,砂岩占地层厚度比例为40%~50%(黄骅台陷北部地区可达60%)。有效孔隙度为24%~33%,热水温度56~85℃。东营组热储岩性主要为砂岩,砂岩呈反旋回序列,单位涌水量0.33 m³/h·m,稳定流温90~93℃,孔隙率23.11%~32.57%。

3.2.2 白垩系热储

白垩系热储层主要分布于松辽盆地、鄂尔多斯盆地的中部及西部大片地区、江汉平原的北部与中部局部地区以及西宁盆地的部分地区。该热储层岩性多为砂岩、泥岩、页岩,热储埋藏深度变化较大。

该类型热储中,具有代表性的为鄂尔多斯盆地洛河组热储层。该热储岩性以砂岩、砂砾岩为主。洛河组也是鄂尔多斯盆地内分布最广的含水层。岩层渗透性好,水量较丰富,在盆地中部可自流。在300~1200 m的深度内,砂岩孔隙热水储层的厚

度为100~300 m,该储层在盆地东部埋藏较浅,厚度较薄,在西部埋藏较深,厚度较大,从整个盆地来看,储层温度多在25~55℃。

3.2.3 二叠—三叠系热储

二叠—三叠系热储层分布较少,主要分布于四川盆地,在汾渭盆地的清交凹陷、曲亭等地有一定范围分布,准噶尔盆地也有分布。该热储层岩性在四川盆地多为石灰岩,其热储类型属于岩溶型层状热储;汾渭盆地多为砂岩,热储埋藏深度变化较大,属于孔隙型层状热储;准噶尔盆地内的该层热储则属于裂隙型层状热储。本层地热水循环能力相对较差。

该类型热储中,具有代表性的为四川盆地三叠系雷口坡组、嘉陵江组与二叠系茅口组热储层。茅口组热储岩性主要为含煤的碎屑岩夹铝土岩,上部为石灰岩夹燧石结核,厚约千余米,中部整体热储层温度较高,均大于60℃,热储温度变化由周边向盆地中心温度逐渐增加。雷口坡组、嘉陵江组热储由海陆交互相、浅海相砂泥岩、碳酸盐岩组成;中部温度变化范围为40~180℃,大致呈西高东低、中间高四周低的由东南向西部逐渐递增的趋势变化。

3.2.4 寒武—奥陶系热储

寒武—奥陶系热储层分布范围较广,是常见的岩溶热储层,主要分布范围包括华北平原的构造凸起区、河淮平原的汤阴断陷地区、汾渭盆地的部分地区、鄂尔多斯盆地北部与银川平原中部。该热储

表2 主要盆地新近系—古近系热储分布
Table 2 Reservoir distribution of Neogene and Paleogene in the main basins

盆地	新生界		
	第四系	新近系	古近系
华北平原		明化镇组、馆陶组	东营组
河淮盆地		明化镇组、馆陶组	沙河街组、东营组
苏北盆地		盐城组	三垛组、戴南组
下辽河盆地		馆陶组	
江汉盆地		广化寺组	沙市组、新沟嘴组、荆沙组、潜江组、荆河镇组
河套平原		粉细砂	
汾渭盆地	三门组、秦川群	张家坡组、兰田瀾河组、冷水沟—寇家村组、红河组	白鹿塬组
银川平原		干河沟组、红柳沟组	清水营组

层岩性多为碳酸盐岩,为岩溶型热储。热储埋藏深度变化较大。

该类型热储中,具有代表性的为河淮平原寒武—奥陶系热储。寒武系为一套滨海氧化还原环境中的沉积产物,下统为含磷砂岩、含膏白云岩、云斑灰岩、泥质白云岩,中统为含云母页岩、海绿石砂岩夹石灰岩、鲕状灰岩,上统为泥质白云岩、白云岩。奥陶系为一套灰色厚层—巨厚层灰岩夹白云岩、角砾状灰岩、角砾状白云岩的岩石组合。底部含砂砾。由于受构造控制,热储裂隙、溶隙、溶洞发育程度不同,富水性不均,在构造带附近,岩溶、裂隙发育,富水性较好。

3.2.5 元古宇—太古宇热储

元古宇—太古宇热储层分布范围相对较小,多分布于元古宙—太古宙地层有出露或埋藏较浅的地区,包括华北平原中部与北部、汾渭盆地的大同盆地、忻州盆地与关中盆地西部、河套平原的呼和浩特地区。该热储层为岩溶热储,岩性在华北平原为碳酸盐岩,在汾渭盆地和河套平原则为变质岩。热储埋藏深度变化较大。

该类型热储中,具有代表性的为华北平原中新元古界热储,包括蓟县系雾迷山组热储与长城系高于庄组热储。雾迷山组热储是一套浅海相沉积,岩性为白云岩、中部夹泥质白云岩,经历了漫长的地质时期剥蚀风化和淋滤作用,风化壳厚度较大,一般为20~30 m,大者70 m,岩溶裂隙发育,连通性好,热储层厚度占地层厚度的25%~64.2%,热储层

平均有效孔隙度3%~6%。单井涌水量400~1500 m³/d,井口水温达到60~80℃,最高可达104℃。该热储层是本区最好的基岩热储层。长城系高于庄组热储层岩性为灰色白云岩、角砾岩、泥质白云岩,单井涌水量400~1500 m³/d,井口水温达到50~80℃。

4 水化学特征

4.1 总体分布特征

中国大面积分布的中、新生代陆相沉积盆地,但由于盆地的沉积环境、发展历史和基底构造的不同,其中地下热水的水化学成分比较复杂,沉积盆地型热水资源的形成与储存需要较大规模的储集层与隔水盖层(任加国等,2014)。地下热水总体径流途径较长,埋藏较深,储存环境较封闭,矿化度相对较高,水质相对较差。同时由于地下热水温度相对较高,与围岩反应更加强烈,溶解的化学物质总量较大,成分也比普通盆地地下水复杂,多含有多种微量元素。对地热水的水化学特征研究可以揭示地热流体的来源、成因、年龄、运移储存状态、储层温度等特征。

受补给、径流、排泄条件及地质构造的控制,从山前到盆地中部由浅层热储到深部热储,沉积盆地型地下热水水化学类型一般由HCO₃-Na型、HCO₃·Cl-Na型等低矿化水,逐渐过渡为Cl·HCO₃-Na型,最终到排泄区或封闭状态下变为Cl-Na型等高矿化水,矿化度从浅到深也逐步增大。从区域地球化学特征来看,沉积盆地地下热水总的径流方向是由山前向盆地中心、或由地势较高处向排泄区两个径流方向,沉积盆地水化学的基本特征可以反映地下热水的补给条件。

热盆由于地热水赋存条件较好,热储层一般分布面积较大,从山前至盆地中心都有分布,有足够的规模使水动力环境出现明显分带的特点(任加国等,2014)。盆地山前地带为地热水的补给区,也是地表水和大气降水渗滤的交替区域,地热水常为低矿化度的HCO₃型热水。向盆地中心的径流过渡地区,地热水径流交替强度逐渐变小,矿化度逐渐增大,水中Cl⁻、SO₄²⁻等离子逐渐成为主要离子。至盆地中心的地下水排泄区,化学类型基本变为Cl-Na型、Cl-Ca型,矿化度一般>1 g/L。

温盆、冷盆地热发育条件限制,热储层一般埋藏较深,径流循环条件较差,具有密闭的成岩背景,表现出典型的深层地下水特征,多水油同层,多盐卤水。江汉盆地(王开华,2008)、四川盆地(林耀庭,2006)、柴达木盆地(李建森等,2014),由于地层中分布有盐岩层,地下热水矿化度极高,并出现热卤水,矿化度大于100 g/L,多为Cl-Na-Ca型水。鄂尔多斯等盆地地下热水的矿化度较高,一般在50 g/L,最高可达70~80 g/L,多为Cl-Na型水。越靠近凹陷或盐岩地层,矿化度越高,所富含的微量元素含量越高。

4.2 不同热储水化学特征

中国沉积盆地地热资源分布广泛,热储层多样。不同热储层由于其补给、径流、排泄条件的不同,地热水化学特征也有很大不同。

4.2.1 新近系—古近系热储

新近系热储层主要分布在地热资源赋存条件较好、地温梯度较高的热盆地中。该热储层一般埋藏较浅,多为盆地内多层热储的第一个热储层,热储温度相对较低。热储层岩性多为松散的砂、砾岩和砂岩,透水性较好,地热水流通能力较强。地热水一般矿化度较小、水质较好,具有浅层地下水的性质。

该类型热储中,具有代表性的为华北平原新近系明化镇组、馆陶组、古近系东营组热储。华北平原明化镇组热储大面积分布,为半开启的封闭环境,地下水广泛接受现代降水和古降水的淋滤,地下水交替强烈,因此赋存其中的地热水为低温承压水,除局部地区小于1 g/L或大于7 g/L之外,大部分地区矿化度基本在1.0~4.0 g/L,水化学类型为HCO₃-Na型水,个别地区水化学类型为Cl-Na型和Cl·HCO₃-Na型水(图2),pH大部分在7.22~8.98,呈弱碱性。馆陶组热储岩性以河流相的粉细砂岩、

砂砾岩为主,为半封闭的水文地质环境,馆陶组热储水化学类型以Cl·HCO₃-Na和Cl-Na型为主大部分地区矿化度在2~6 g/L,分布广泛,pH在7.1~8.75,呈弱碱性。东营组热储分布面积较小,环境较为封闭,地热水的水化学类型以Cl-Na·Ca型为主,其次为Cl-Na型,矿化度相对较高(表3)。

4.2.2 白垩系热储

白垩系热储层多由砂岩、泥岩、页岩,热储埋藏深度变化较大,地热水矿化度相对不高,基本小于10 g/L、水质相对较好,在大型盆地内的热储层水化学性质表现出强烈的分带性。

该类型热储中,具有代表性的为鄂尔多斯盆地白垩系洛河组热储。该热储在鄂尔多斯盆地广泛分布,受地下水径流条件控制,以盆地中部的分水岭为界,向各个方向水化学特征的变化具有典型的水平分带性。分水岭两侧以低矿化度的HCO₃型水为主,随着径流路径的增长逐步变为HCO₃·Cl型水、HCO₃·SO₄型水和SO₄·Cl型水。部分地区白垩系洛河组岩层裸露或埋藏较浅的地区,矿化度较低。

4.2.3 二叠—三叠系热储

二叠—三叠系热储层分布较少,热储层岩性在四川盆地多为石灰岩,汾渭盆地多为砂岩,热储埋藏深度变化较大。本层地热水循环能力相对较差,矿化度相对较高,在四川盆地多为盐水、卤水,在汾渭盆地多为咸水,矿化度基本都为几十甚至上百g/L、水质相对较差。

该类型热储中,具有代表性的为四川盆地三叠系雷口坡组、嘉陵江组与二叠系茅口组热储层。该热储层埋藏较深,地下水所处环境较为封闭,在长距离径流后,由径流路径至盆地的排泄区地下水从SO₄-Ca型水和SO₄-Ca·Mg型水逐步变为以高矿化度的Na-Cl型水为主矿化度最高达200 g/L,为

表3 华北平原新近系—古近系热储水化学特征

Table 3 Chemical characteristics of hydrothermal reservoirs in Neogene and Paleogene

热储层	地热井编号	水温 /(°C)	(Na ⁺ +K ⁺) /(mg/L)	Ca ²⁺ /(mg/L)	Mg ²⁺ /(mg/L)	Cl ⁻ /(mg/L)	HCO ₃ ⁻ /(mg/L)	SO ₄ ²⁻ /(mg/L)	pH	矿化度 /(mg/L)	水化学类型
明化镇组	JHE21	36.5	663.40	14.40	4.90	751.60	395.40	0.10	8.23	1860	HCO ₃ -Na
	JHE102	43.0	317.40	14.40	3.90	265.20	407.60	0.50	8.13	1041.10	HCO ₃ ·Cl-Na
馆陶组	JHE87	56.0	1917.90	110.60	34.50	2921.30	214.80	154.50	7.56	5404.60	Cl-Na
	JHE108	62.0	713.70	45.70	11.70	787.10	749.30	26.30	7.10	2451.50	Cl·HCO ₃ -Na
东营组	东热1		5300.00	2166.96	423.41	13088.22	83.19	233.75	7.10	21.39	Cl-Na·Ca
	东热5		5246.50	1565.98	254.14	11811.27	84.93	17.50	6.90	19.08	Cl-Na

盐卤水。盐卤水同海相沉积关系密切, Mg^{2+} 的含量较海水蒸发同期低, Ca^{2+} 的含量较海水蒸发同期高, 说明在卤水演化过程中发生了白云岩化作用和阳离子交换作用, SO_4^{2-} 含量较海水蒸发同期低, 这是由于厌氧细菌通过生物化学作用将 SO_4^{2-} 分解成为 H_2S 所致。

4.2.4 寒武—奥陶系

寒武—奥陶系热储层分布范围较广, 是常见的岩溶热储层, 储层岩性多为碳酸盐岩, 为岩溶型热储。热储埋藏深度变化较大。由于岩溶含水层地下水流通性较高, 地热水水质相对较好, 矿化度不大, 多为淡水与微咸水。

该类型热储中, 具有代表性的为河淮平原寒武—奥陶系热储。自补给到排泄区的水化学特征具有分带性规律: 自南向北, 随着岩溶含水层埋深的加大, 径流途径加长, 水岩作用时间增加, 岩溶地下水的交替条件由快变慢, TDS、 SO_4^{2-} 含量由小变大, Ca^{2+} 浓度则由大变小, 水化学类型由补给区的 HCO_3 型转变为排泄区的 $HCO_3 \cdot SO_4$ 型和 $SO_4 \cdot HCO_3$ 型。水化学分析充分说明岩溶水水化学特征可指示岩溶水的补给径流条件。本区部分寒武—奥陶系岩层出露, 岩溶地下水主要接受大气降水的入渗补给, 径流过程中, 形成的一些区域岩溶水系统内的一些局部流动系统, 地下水径流途径较短, 补给交替强烈, 地下水矿化度较小; 而在大区域的岩溶热储层中, 排泄区地下水矿化度变大, 最大约 4 g/L。

4.2.5 元古宇—太古宇

元古宇—太古宇热储层分布范围相对较小, 多分布于元古宇—太古宇地层有出露或埋藏较浅的地区, 为岩溶热储, 岩性在华北平原为碳酸盐岩, 在汾渭盆地则为变质岩。热储埋藏深度变化较大。由于岩溶含水层地下水流通性较高, 地热水水质相对较好, 矿化度不大, 多为淡水与微咸水。该类型热储中, 具有代表性的为华北平原中新元古界热

储, 包括蓟县系雾迷山组热储与长城系高于庄组热储。该热储裂隙、孔洞发育, 地下水循环条件较好。地热水矿化度一般为 0.6~7 g/L, 水化学类型以 $Cl-Na$ 、 $Cl \cdot HCO_3 \cdot SO_4-Na$ 型水为主, pH 多在 8 左右。热储阳离子均以 Na^+ 为主, 阴离子受补给源远近、热储埋深、构造位置及上覆地层等多种因素影响, 表现为垂直及水平方向的分带性。水平上, 自山前向平原中部回流, 矿化度逐步由 1 g/L 升为数十克, 反映了地下水补给—循环交替—滞留—排泄的变化规律。垂向上, 主要受所在热储层与构造位置的影响, 一般凸起区水质优于凹陷区, 高凸起区优于低凸起或潜山区。

在华北平原中(表4), 雾迷山组热储是一套浅海相沉积, 岩性为白云岩、中部夹泥质白云岩, 经历了漫长的地质时期剥蚀风化和淋滤作用, 风化壳厚度较大, 一般为 20~30 m, 大者 70 m, 岩溶裂隙发育, 连通性好, 热储层厚度占地层厚度的 25%~64.2%, 热储层平均有效孔隙度 3%~6%。单井涌水量 400~1500 m^3/d , 井口水温达到 60~80℃, 最高可达 104℃。该热储层是本区最好的基岩热储层。长城系高于庄组热储层岩性为灰色白云岩、角砾岩、泥质白云岩, 单井涌水量 400~1500 m^3/d , 井口水温达到 50~80℃。

5 地热资源评价

5.1 评价方法

根据不同温度地热资源开发利用方向不同, 将 25~40℃, 40~60℃, 60~90℃, 90~150℃, >150℃ 五个不同温度范围地热资源分别进行评价, 包括地热资源量、地热资源可开采量、地热流体储存量、地热流体可开采量、地热流体可开采热量、考虑回灌条件下地热流体可开采量、考虑回灌条件下地热流体可开采热量, 其中有井控制的, 须同时满足埋深在 4000 m 以内且热储层温度 25℃ 以上和单井出水

表 4 主要盆地元古界—太古界热储水化学特征

Table 4 Chemical characteristics of hydrothermal reservoir in Proterozoic and Archean

热储层	地热井 编号	水温/℃	(Na^+K^+) /(mg/L)	Ca^{2+} /(mg/L)	Mg^{2+} /(mg/L)	Cl^- /(mg/L)	HCO_3^- /(mg/L)	SO_4^{2-} /(mg/L)	pH 值	矿化度 /(mg/L)	水化学类型
	JHE22	81	873.5	60.9	23.3	1177	654.1	0.6	248.2	2907.1	$Cl-Na$
蓟县系	JHD1		562	46.1	12.8	382.9	332.6	0	8.1	1913	$Cl \cdot HCO_3 \cdot SO_4-Na$
雾迷山组	JJH1		659.8	41.3	14.9	586.7	381.4	343	8.3	2082.1	$Cl-Na$
	JHE103	62	154.8	16.8	7.3	361.2	56.7	30	72.1	687.5	HCO_3-Na

量大于 20 m³/h。没有井控制、资料较少的,远景评价区通过盖层平均地温梯度大于 2.5°C/100 m 来圈定热储面积,地温梯度、热储层厚度、砂厚比根据以往成果资料获得,热储层温度采用地温梯度推算确定,具体计算方法如下(王贵玲,2013):

(1) 地热资源量,计算采用热储法计算,表达式为:

$$Q = C_r \rho_r (1 - \phi) V (T_1 - T_0) + C_w \rho_w q_w (T_1 - T_0)$$

式中: Q —地热资源量, KJ; C_r, C_w —分别为热储岩石比热和水的比热, kJ/kg·°C; ρ_r, ρ_w —分别为热储岩石密度和水的密度, kg/m³; ϕ —热储岩石孔隙率(或裂隙率); q_w —流体储量,包括静储量和弹性储量, m³; T_1 —热储温度, °C; T_0 —恒温层温度, °C; V —热储体积, m³。

(2) 地热资源可开采量计算,地热资源可开采量即为可利用地热资源量,可利用地热资源量采用回收率法进行计算,计算公式如下:

$$Q_{wh} = R_E \cdot Q$$

式中: Q_{wh} —地热资源可开采量, kJ; R_E —回收率; Q —地热资源量, kJ。

用热储法计算出的地热资源量不可能全部被开采出来,只能开采出一部分,二者的比值称为回收率。回收率根据工作区的实际情况,参考《地热资源评价方法》DZ40-85 关于回收率的有关规定确定。对于大型沉积盆地的新生代砂岩,当孔隙度大于 20%,热储回收率定为 0.25,碳酸盐岩裂隙热储定为 0.15,中生代砂岩和花岗岩等火成岩类热储则根据裂隙发育情况定为 0.05~0.10。

(3) 地热流体储量计算,包括容积储量与弹性储量两部分。计算公式如下:

$$Q_{\text{储}} = \phi V + S(h - H) A$$

式中: $Q_{\text{储}}$ —地热流体储量, m³; ϕ —热储岩石孔隙率(或裂隙率); V —热储体积, m³; S —弹性释放系数; h —平均承压水头标高, m; H —平均热储顶面标高, m; A —评价热储面积, m²。

(4) 地热流体可开采量计算,单井地热流体可开采量采用最大允许降深法或开采系数法确定:

a) 最大允许降深法

可采地热流体量采用最大允许降深法,设定一定开采期限内(一般为 100 年),计算区中心水位降深与单井开采附加水位降深之和不大于 100 m 时,求得的最大开采量,为计算区地热流体的可开采

量。表达式为:

$$Q_{wk} = \frac{4\pi TS_1}{\ln(6.11t)} = \frac{4\pi TS_1}{\ln\left(\frac{6.11Tt}{\mu^* R_1^2}\right)}$$

$$Q_{wd} = \frac{2\pi TS_2}{\ln\frac{0.473R_2}{r}}$$

式中: Q_{wk} —地热流体可开采量, m³/a; Q_{wd} —单井地热流体可开采量, m³/a; S_1 —计算区中心水位降深, m; S_2 —单井附加水位降深, m; R_1 —开采区半径, m; R_2 —单井控制半径, m; μ^* —热储含水层弹性释放系数; t —开采时间, a; T —导水系数, m²/a; r —抽水井半径, m。

b) 开采系数法

地热远景区采用可采系数法,开采系数的大小,取决于热储岩性、孔隙裂隙发育情况以及补给情况,有补给情况下取大值,无补给情况下取小值。

$$Q_{wk} = Q_{\text{储}} \cdot X$$

式中: $Q_{\text{储}}$ —地热流体储量, m³; X —可采系数,其中:

① 隙型层状热储层, X 取值 3%~5%(100 年), 即 0.0003~0.0005(每年);

② 岩溶型层状热储层, X 取值 5%(100 年), 即 0.0005(每年);

③ 裂隙型层状热储层, X 取值 1%~2%(100 年), 即 0.0001~0.0002(每年)。

(5) 地热流体可开采热量可用下式计算:

$$Q_p = Q_{wk} C_w \rho_w (T_1 - T_0)$$

式中: Q_p —地热流体可开采热量, kJ/a; C_w —地热流体的比热, kJ/kg·°C; ρ_w —地热流体的密度, kg/m³; T_1 —热储温度, °C; T_0 —恒温层温度, °C。

(6) 考虑回灌条件下地热流体可开采量计算

对于盆地型地热田,按回灌条件下开采 100 年,消耗 15% 的地热储量,根据热量平衡计算影响半径和允许开采量公式如下:

$$R = \sqrt{1 - \alpha\beta} \times \sqrt{\frac{Q_{\text{抽}} t f}{0.15 H \pi}}$$

$$f = \frac{\rho_w C_w}{\rho_c C_c}$$

$$\rho_c C_c = \varphi \rho_w C_w + (1 - \varphi) \rho_r C_r$$

$$\alpha = \frac{Q_{\text{回灌}}}{Q_{\text{抽}}}$$

$$\beta = \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0}$$

$$Q_{允} = \frac{AQ_{抽}}{\pi R^2} = \frac{0.15AH}{(1-\alpha\beta)tf}$$

式中:R—回灌条件下的影响半径,m; ρ_w, ρ_r —热储水的密度,岩石的密度,kg/m³; C_w, C_r —热储水的比热,岩石的比热,kJ/kg·°C; α —热储岩石孔隙度; t —时间,取100年,36500 d; $Q_{抽}$ —20 m水位降深时,单井涌水量,m³/d; $Q_{回灌}$ —回灌量,m³/d; T_1 —热储温度,°C; T_2 —回灌温度,取25°C; T_0 —恒温层温度,°C; α —回灌率,考虑热储岩性、孔隙裂隙发育情况,孔隙型层状热储层取30%、岩溶型层状热储层取90%、裂隙型层状热储层取50%; $Q_{允}$ —回灌条件下允许开采量,m³/d; A —评价面积,m²; H —热储层厚度,m。

(7)考虑回灌条件下地热流体可开采热量计算公式

考虑回灌条件下,地热流体可开采热量计算公式,见地热流体可开采热量计算公式。

5.2 综合评价

利用如上评价方法,进行了沉积盆地型地热资源潜力评价。中国主要沉积盆地地热资源储存在量为3.11×10¹⁹kJ,折合标准煤1.06×10¹²t,地热资源可开采量为5.29×10¹⁸kJ,折合标准煤1.80×10¹¹t,地热流体可储存在量为3.87×10¹³m³,地热流体可开采量1.44×10¹⁰m³/a,地热流体可开采热量2.65×10¹⁵kJ/a,折合标准煤9.83×10⁷t,考虑回灌条件下地热流体可开采总量为2.59×10¹¹m³/a,对应可开采流体热量为4.98×10¹⁶kJ/a,折合标准煤1.70×10⁹t(表5)。地热资源的开发利用每年可替代9.05×10⁷t标煤,可减少二氧化碳气体排放3.60×10⁸t,可减少二氧化硫排放2.56×

10⁶t,可减少氮氧化物排放9.05×10⁵t,可减少悬浮粉尘1.21×10⁶t,可减少煤灰渣排放量1.513×10⁷t。

中国主要沉积盆地中地热资源储量较大的是华北平原、河淮平原和四川盆地,其次为汾渭盆地、鄂尔多斯盆地和松辽盆地。其中热盆包括华北平原、河淮平原、苏北平原、松辽盆地、下辽河平原和汾渭盆地,热盆地热资源储量较大,占到主要沉积盆地总储存在量的54%,地热资源可开采量占到主要沉积盆地总可开采量的59%;温盆包括鄂尔多斯盆地、四川盆地、江汉盆地、河套盆地、银川平原和西宁盆地,温盆地热资源储量占到42%,可开采量占到40%;冷盆包括准噶尔盆地、塔里木盆地和柴达木盆地,地热资源储量仅占到4%,可开采量占到1%。

根据中国主要沉积盆地地热资源储存在量和可开采量按温度对比图(图2),我国主要沉积盆地中90~150°C和60~90°C的地热资源储存在量和可开采量占较大比例。90~150°C地热资源储存在量占到

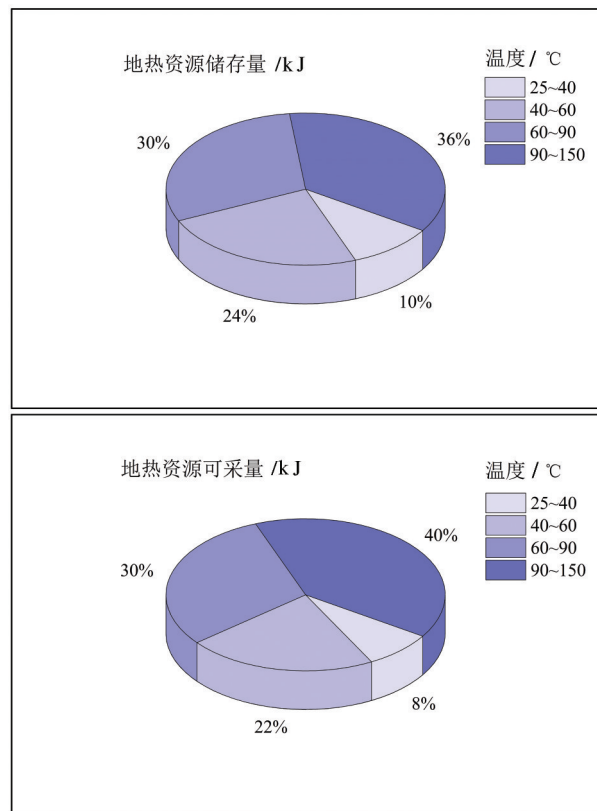


图2 主要沉积盆地地热资源储存在量和可开采量按温度对比图
Fig.2 Comparison of reserves at different temperature ranges in main sedimentary basins

表5 中国地热资源潜力

Table 5 Reserves of geothermal resources in China

地热资源或地热流体	数量	折合标准煤/t
地热资源储存在量/kJ	3.11×10 ¹⁹	1.06×10 ¹²
地热资源可开采量/kJ	5.29×10 ¹⁸	1.80×10 ¹¹
地热流体可储存在量/m ³	3.87×10 ¹³	--
地热流体可开采量/(m ³ /a)	1.44×10 ¹⁰	--
地热流体可开采热量/kJ	2.65×10 ¹⁵	9.83×10 ⁷
考虑回灌条件下地热流体可开采总量/(m ³ /a)	2.59×10 ¹¹	--
考虑回灌条件下可开采流体热量/(kJ/a)	4.98×10 ¹⁶	1.70×10 ⁹

40%, 地热资源可开采量占36%; 60~90℃的地热资源储量占到30%, 地热资源可开采量占30%; 40~60℃的地热资源储量占到22%, 地热资源可开采量占24%; 25~40℃的地热资源储量占到8%, 地热资源可开采量占10%; 高于150℃的地热资源储量很少, 低于1%(表6)。

6 展 望

6.1 进一步加强地热资源勘查工作

目前完成的全国地热资源潜力, 限于面上调查, 地热勘查程度低, 亟需进行整装勘查, 瞄准需求, 针对重点经济带, 选择具有开发利用远景、尚未开展详细地热调查评价的地热区(田)开展地热资源勘查, 建立热储模型, 评价地下热储的资源量及发电潜力。

6.2 积极开展地热资源回灌, 保证可持续开发利用

地热资源是在漫长的地质历史发展过程中形成的, 是含有多种矿物质和丰富热焓的流体资源, 是安全、稳定、高效的可再生能源。为保证地热资源的可持续利用, 在开发利用过程中必须做到科学、合理、有序。考虑回灌条件下, 不同地区地热流体可开采量与可开采热量可增加几倍到几十倍。需实行采、灌结合的开发模式, 提高“热”的利用率, 减少废弃水排放对环境的污染, 保持合理的水头以改善提取地热水的条件并降低开采利用的成本。提倡采、灌结合开采模式, 保障平原盆地区中低温地热资源可持续利用。

6.3 推进地热资源梯级综合利用

在有供暖、供热(水)的社会需求的地区, 中低温地热资源开发, 则应建立供暖、供热-温泉沐浴-温室种植(养殖)-环境用水的梯级利用模式。有条件的地区, 则可建立发电-供热采暖-生活热水-温

泉沐浴-环境用水的综合利用模式。南方地区无供暖需求, 中低温地热资源的开发, 应建立发电-工业烘干-生活热水-温泉沐浴-环境用水的综合利用模式。

6.4 建立地热资源监测网

监测网的建立和监测点的合理布设, 可及时掌握地热流体质、量变化情况, 有效监测地热开发引起的储层压力变化, 为资源评价、地热管理提供基础资料, 有效合理的规划地热资源开发。

7 结 论

(1)我国主要沉积盆地中地温梯度值多在1.5~4.0℃/100 m, 多数盆地小于3.0℃/100 m。地温的垂向变化受基底构造因素控制, 隆起区其垂向增温较快, 在台陷、断凹区则增温较慢。此外, 垂向上的地温梯度、基岩热储温度还与基岩埋深、地层岩性等有关。

(2)我国沉积盆地地热资源分布广泛, 热储层多样, 存在东西差异。东部地区沉积巨厚, 发育多层叠置的热储系统, 主要热储层是新生界砂岩孔隙型热储和古生界与中上元古界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储。向西区地壳逐渐增厚, 盆地热流值低, 主要热储层是古近系砂砾孔隙型热储和古生界碳酸盐岩岩溶裂隙型热储。

(3)不同热储层地热水化学特征也有很大不同。地热水的补给区常为低矿化度的HCO₃型热水; 径流过渡地区矿化度逐渐增大, 水中Cl⁻、SO₄²⁻等离子逐渐成为主要离子; 地下水排泄区化学类型基本变为Cl-Na型、Cl-Ca型, 矿化度一般>1 g/L。

(4)我国主要沉积盆地地热资源储量为3.11×10¹⁹ kJ, 折合标准煤1.06×10¹² t, 回灌条件下地热流体可开采热量为4.98×10¹⁶ kJ/a, 折合标准煤1.70×

表6 主要沉积盆地地热资源不同温度资源量及百分比

Table 6 Comparison of reserves at different temperature ranges in main sedimentary basins

温度范围/℃	地热资源量			地热资源可采量		
	地热资源储量/kJ	折合标准煤/t	百分比	地热资源可采量/kJ	折合标准煤/t	百分比
25~40	2.54×10 ¹⁸	8.68×10 ¹⁰	8	5.03×10 ¹⁷	1.72×10 ¹⁰	10
40~60	6.64×10 ¹⁸	2.27×10 ¹¹	22	1.28×10 ¹⁸	4.35×10 ¹⁰	24
60~90	9.42×10 ¹⁸	3.21×10 ¹¹	30	1.59×10 ¹⁸	5.42×10 ¹⁰	30
90~150	1.24×10 ¹⁹	4.24×10 ¹¹	40	1.91×10 ¹⁸	6.53×10 ¹⁰	36
>150	3.36×10 ¹⁶	1.15×10 ⁹	0	8.39×10 ¹⁵	2.86×10 ⁸	0
总计	3.11×10 ¹⁹	1.06×10 ¹²	100	5.29×10 ¹⁸	1.80×10 ¹¹	100

10⁹t。其中主要为90~150℃和60~90℃的中温热水,占总储存量的70%,占总可开采量66%。

(5)目前完成的全国地热资源潜力,地热勘查程度低,亟需进行整装勘查。同时为保证地热资源的可持续利用,在开发利用过程中必须做到科学、合理、有序。提倡采、灌结合开采模式,推进地热资源梯级综合利用,建立地热资源监测网。

References

- Anna Sowizdzal. 2018. Geothermal energy resources in Poland – Overview of the current state of knowledge[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82: 4020–4027.
- Chen Moxiang, Deng Xiao. 1998. The distributive characteristics of geothermal water and its nature in China[J]. *Quaternary Sciences*, 16(2):1–5(in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1994. Geothermal Resources in China— Formation Characteristics and Potential Evaluation[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English Abstract).
- Dai Baohua. 2017. Study on strategic exploitation & utilization of China's geothermal energy[J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2(1): 6–12(in Chinese with English abstract).
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892–2901(in Chinese with English abstract).
- Jiang Jianjun, Tao Qingfa, Hu Jie. 2005. Development, utilization, problems and suggestions of geothermal resources in China[C]// *Proceedings of the National Symposium on Sustainable Development of Geothermal Industry*, 85–91(in Chinese).
- Li Huping, Huo Gailan, Feng Baoai, Chang Zhongyao. 2014. Investigation, Evaluation and Regionalization Report of Geothermal Resources in Inner Mongolia Autonomous Region[R]. Geological Survey Institute of Inner Mongolia Autonomous Region (in Chinese).
- Li Jiansen, Li Tingwei, Peng Ximing, Han Yuanhong, Li Zhongping, Ma Haizhou. 2014. Hydrogeochemical behaviors of oilfield water in the Tertiary in western Qaidam Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 35 (1): 50–55(in Chinese with English abstract).
- Li Jun, Wang Quankai, Wang Yan, Liu Zhongkai, Kang Lin, Zhao Hongya, Zhang Yongshu, Zhao Yang, Wang Laibin, LV Wenbin, Liu Jiangtao, Chang Jiang, Lv Dongdong, Yang Chao, Ding Chengyu, Zhang Huan, Luan Shuai. 2014. Investigation, Evaluation and Regionalization Report of Geothermal Resources in Hebei Province[R]. The Third Hydrological Engineering Geological Brigade of Hebei Geological and Mineral Bureau(in Chinese).
- Li Lujuan. 2011. The Asian Geothermal Map and the Evaluation on Geothermal Potential[D]. Jilin: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- Liang Zengzhou, Wu Yu, Xin Changgeng. 1975. Geothermal investigation report of Lhasa City, Tibet[R]. Census Bureau of Tibet Geological Bureau(in Chinese).
- Lin Yaoting. 2006. On the hydrogeological conditions of groundwater in the Triassic System of Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 14(1):1–8(in Chinese with English abstract).
- Liu Fang. 2009. Investigation and evaluation report on geothermal resources in Guanzhong Basin, Shaanxi Province[R]. Shaanxi Geological Environmental Monitoring Station(in Chinese).
- Muffler E L J P. 1979. Assessment of Geothermal Resources of the United States–1978[R]. U.S. Geological Survey.
- Reed Marshall J. 1983. Assessment of Low– Temperature Geothermal Resources of the United States–1982[R]. U.S. Geological Survey.
- Ren Jianguo, Wu Qianqian. 2014. Hydrogeochemical[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Ren Zhanli. 1999. Tectonic Thermal Evolution History of Sedimentary Basins in northern China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Tian Tingshan, Li Minglang Bai Ye. 2006. Geothermal Resources and their Development and Utilization in China[M]. Beijing: China Environmental Press(in Chinese).
- Tomas Campos. 1988. Geothermal resources of El Salvador. Preliminary assessmen[J]. *Geothermics*, 17(2): 319–332.
- Wang Guiling. 2013. Evaluation of Geothermal Resources in China and Technical Requirements for Regionalization[R]. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Wang Guiling, Wu Qinghua, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Zhang Wei, Liu Chunlei, Wang Wanli, Ma Feng, Yang Hui Feng, Liu Zhiming, Chen Dehua, Chen Hao. 2011. National Carbon Dioxide Geological Storage Potential Evaluation and Demonstration Project–Geothermal Conditions of Carbon Dioxide Geological Storage in Major Sedimentary Basins in China[R]. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS(in Chinese).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 8(4):449–459,134 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. *Geology in China*, 44(6): 1074–1085(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling. 2015. Thematic and Comprehensive Study on the Investigation and Evaluation of Geothermal Resources in China[R].

- The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS (in Chinese).
- Wang Kaihua. 2008. Groundwater quality in Jiangnan Oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 34(14):24–25 (in Chinese with English abstract).
- Wang Li. 2006. Ningxia Geothermal Prospect Survey and Yinchuan Plain Geothermal Resources Evaluation Report[R]. The Ningxia Hui Autonomous Region geological survey (in Chinese).
- White D E, Williams D L. 1975. Assessment of Geothermal Resources of the United States—1975[R]. U.S. Geological Survey.
- Williams C F, Reed M J, Mariner R H. 2008. A Review of Methods Applied by the U.S. Geological Survey in the assessment of Identified Geothermal Resources[R]. U.S. Geological Survey Open—File Report, 1296:27.
- Yang Jiansong. 1985. Report on Geothermal Investigation in Nanjing[R]. The First Hydrogeology and Engineering Geological Brigade of Jiangsu Provincial Bureau of Geology and mineral resources (in Chinese).
- Youngmin Lee, Sungho Park, Jongchan Kim, Hyoung Chan Kim, Min—Ho Koo. 2010. Geothermal resource assessment in Korea[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14:2392–2400.
- Zeng Ruixiang, Zhang Jinping, Wang Zhi. 2007. Report on Investigation and Evaluation of Geothermal Resources Potential in Beijing[R]. Beijing Institute of Geological Survey (in Chinese).
- Zhang Dezhong, Liu Zhigang, Lu Hongliu. 2013. Geothermics of Hebei[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Jinhua, Wei Wei. 2011. Distribution characteristics and utilization of geothermal resources in China[J]. Resource Economy, 24(8):23–24, 28, 54–55 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 陈墨香, 邓孝. 1998. 中国地下热水分布之特点及属性[J]. 第四纪研究, 16(2):1–5.
- 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 1994. 中国地热资源—形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社.
- 戴宝华. 2017. 我国地热资源开发利用与战略布局思考[J]. 石油石化绿色低碳, 2(1): 6–12.
- 姜光政, 高棚, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 59(8): 2892–2901.
- 姜建军, 陶庆法, 胡杰. 2005. 我国地热资源开发利用状况、存在问题与建议[C]. 全国地热产业可持续发展学术研讨会论文集. 国土资源部, 85–91.
- 李虎平, 霍改兰, 冯宝爱, 常忠耀. 2014. 内蒙古自治区地热资源现状调查评价与区划报告[R]. 内蒙古自治区地质调查院.
- 李建森, 李廷伟, 彭喜明, 韩元红, 李中平, 马海州. 2014. 柴达木盆地西部第三系油田水水文地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 35(1):50–55.
- 李郡, 王全凯, 王琰, 刘忠凯, 康琳, 赵红亚, 张永树, 赵阳, 王来宾, 吕文斌, 刘江涛, 常江, 吕冬冬, 杨超, 丁承裕, 张欢, 栾帅. 2014. 河北省地热资源现状调查评价与区划报告[R]. 河北省地矿局第三水文工程地质大队.
- 李录娟. 2011. 亚洲地热图编制及地热潜力评估[D]. 吉林大学.
- 梁增寿, 吴玉, 辛长庚. 1975. 西藏拉萨市地热普查报告[R]. 西藏地质局普查大队.
- 林耀庭. 2006. 论四川盆地三叠系地下水水文地质条件[J]. 盐湖研究, 14(1):1–8.
- 刘方. 2009. 陕西省关中盆地地热资源调查评价报告[R]. 陕西省地质环境监测总站.
- 任加国, 武倩倩. 2014. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社.
- 任战利. 1999. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 田廷山, 李明朗, 白治. 2006. 中国地热资源及开发利用[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 王贵玲. 2013. 全国地热资源现状评价与区划技术要求[R]. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 王贵玲, 吴庆华, 梁继运, 蔺文静, 张薇, 刘春雷, 王婉丽, 马峰, 杨会峰, 刘志明, 陈德华, 陈浩. 2011. 全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程——全国主要沉积盆地二氧化碳地质储存地热条件研究[R]. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4):449–459, 134.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 44(6):1074–1085.
- 王贵玲. 2015. 全国地热资源调查评价专题和综合研究[R]. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所.
- 王开华. 2008. 浅谈江汉油田地下水水质[J]. 内蒙古石油化工, 34(14): 24–25.
- 王利. 2006. 宁夏地热远景调查及银川平原地热资源评价成果报告[R]. 宁夏回族自治区地质调查院.
- 杨见松. 1985. 南京市地热普查报告[R]. 江苏省地矿局第一水文地质工程地质大队.
- 增瑞祥, 张进平, 王治. 2007. 北京市地热资源潜力调查评价成果报告[R]. 北京市地质调查研究院.
- 张德忠, 刘志刚, 卢红柳. 2013. 河北地热[M]. 北京: 地质出版社.
- 张金华, 魏伟. 2011. 我国的地热资源分布特征及其利用[J]. 中国国土资源经济, 24(8):23–24, 28, 54–55.