

doi: 10.12029/gc20190522

洪增林, 张银龙, 周阳. 2019. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. 中国地质, 46(5): 1224–1235.

Hong Zenglin, Zhang Yinlong, Zhou Yang. 2019. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin[J]. Geology in China, 46(5):1224–1235(in Chinese with English abstract).

关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用

洪增林¹, 张银龙¹, 周阳^{1,2}

(1. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要: 地热资源的广泛利用有助于减少化石燃料的使用、降低雾霾污染。关中盆地南部山前地区的地热资源丰富, 开发潜力大, 但研究程度较低。本文概述了关中盆地南部山前地区的自然地理概况, 分析了该区域地热资源开发利用过程中存在的问题, 总结了区域地热载体特征和构造单元特征, 划分了区域内近地表处(20 m)、深层(1500 m)处、地温梯度以及大地热流值分布情况。按赋存条件的不同, 将地热流体分为四个地段, 并详细论述每段的地质特征和成因模式。认为研究区地热资源主要来源于地球的内部热能, 其次为地壳中放射性元素衰变、矿物转化过程中产生的热能以及少量生物降解产生的能量, 将地热资源的形成模式分为热传导型和热对流型两类, 热传导型地热资源广泛分布, 热对流型地热资源分布在导通深部高温部位的断裂带附近。采用体积法计算了关中盆地南部山前地区地热单元储存的总热量, 4000 m 以深暂难利用的地热资源量及 4000 m 以浅能利用的地热资源量。采用热流量法计算了宝鸡温水沟、眉县汤浴、蓝田汤浴、华清池和西安东大等高地温异常区的地热流体资源量。根据研究区地热资源赋存规律, 划分了地热资源的鼓励开采区和保持开采区, 指明了地热资源的利用方向。本文旨在适时推动陕西省关中盆地南部山前地区的清洁能源事业, 为区域地热资源的科学、长期开发提供理论依据。

关键词: 关中盆地; 地热资源; 地温; 地热流体; 地热开发利用

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)05-1224-12

Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin

HONG Zenglin¹, ZHANG Yinlong¹, ZHOU Yang^{1,2}

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Geological Survey Center of Hydrogeology, Engineering Geology and Environmental Geology, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: Widespread use of geothermal resources helps reduce the use of fossil fuels and the management of haze. There are rich geothermal resources on the northern foot of the Qinling Mountain, but the research work is slow and unevenly distributed. This

收稿日期: 2018-11-27; 改回日期: 2019-05-28

基金项目: 陕西省公益性地质调查专项“陕西省大中型城市浅层地热能调查评价”(20130202), 陕西省公益性地质工作项目“陕西省浅层地热能赋存规律及开发利用关键技术研究”(20170201)、“关中平原城市群地下空间可持续利用研究”(20180303)及中国地质调查局调查项目“陕西省关中盆地地热资源调查评价”(1212010535416)联合资助。

作者简介: 洪增林, 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事资源环境系统工程、地学工程、能源经济等方面的研究;

E-mail: 77196410@qq.com。

paper outlines the natural geography of the northern foot of the Qinling Mountain, discusses the characteristics of regional geothermal carriers and structural units, describes the distribution at the depth of near-surface (20 m) and deep place (1500 m) as well as geothermal gradients and Geothermal flow value. According to the different characteristics, the geothermal fluid on the northern foot of the Qinling Mountain is divided into four sections, with a discussion given to the characteristics of each section. The authors analyzed geothermal resources on the northern foot of the Qinling Mountain: the main source of energy is the conduction of heat inside the earth, supplementary energy is thermal energy generated by the decay of radioactive elements in rocks in deep formations, and thermal energy is generated during the conversion of montmorillonite to illite and biodegradation of organic matter heat energy. The formation patterns of geothermal resources on the northern foot of the Qinling Mountain are divided into heat conduction type and thermal convection type: Heat conduction geothermal resources are widely distributed, and thermal convection geothermal resources are mainly distributed in areas where deep faults are directly connected with the surface and in the vicinity of the fault zone. The authors calculated the total heat stored in the geothermal unit using the volumetric method and the amount of geothermal resources that are difficult to be used at 4000 m as well as the amount of geothermal resources that can be utilized at 4000 m. The authors calculated the geothermal fluid resources of Wenshuigou in Baoji, Tangyu in Meixian, Tangyu in Lantian, Huaqing Pool and Dongda in Xi'an by using heat flow method. According to the law of geothermal resource occurrence in the study area, the authors divided the whole region into encouraged mining area of geothermal resources and maintained mining area, and pointed out the direction of geothermal resources utilization. The purpose of this paper is to promote the clean energy industry on the northern foot of Qinling Mountains in a timely manner and provide a theoretical basis for the scientific and long-term development of geothermal resources.

Key words: Guanzhong Basin; geothermal resources; ground temperature; geothermal fluid; geothermal development and utilization

About the first author: HONG Zenglin, male, born in 1963, doctor, professor mainly, engages in research work of resources and environment systems engineering, geoscience engineering, energy economy etc; E-mail: 77196410@qq.com.

Fund support: Supported by Special program of public welfare geological survey in Shaanxi "Investigation and evaluation of shallow geothermal energy in large and medium cities of Shaanxi Province" (No. 20130202), "Study on the occurrence pattern of shallow geothermal energy and the key technologies of exploitation and utilization in Shaanxi Province" (No. 20170201), "Study on Sustainable Utilization of Underground Space in Guanzhong Plain Urban Agglomeration" (No. 20180303) and geological survey program of China Geological Survey "Investigation and Evaluation of Geothermal Resources in Guanzhong Basin of Shaanxi Province" (No. 1212010535416).

1 引言

地热能是一种绿色低碳、可循环利用的清洁能源。“十三五”以来,国家和陕西省相继出台了一系列鼓励地热能开发利用的政策措施,关中地区作为全国大气污染防治重点区域,推进地热能开发利用,对调整能源结构、提高环境质量和治污减霾具有重要意义。

地热资源的开发利用首先要求对区域地热资源的赋存规律和形成模式有清晰的认识,许多专家和有识之士对中国的地热资源赋存规律有了宏观的认识(胡圣标等,2011;蔺文静等,2013;何治亮等,2017;王贵玲等,2017;杨立中等,2017),对关中盆地(李修成等,2016;周阳等,2016;周阳等,2018)和国内其他区域地热资源成因模式进行了探讨(刘文通等,1994;赵继昌等,1994;刘文通等,1995;贾

林柱等,2012;李攻科等,2014;李攻科等,2015;赵振等,2015;闫岩等,2017;刘凯等,2017;张森琦等,2018),对有关地热流体、地温场、岩土体热物性参数、开发利用规划等地热资源进行了专题研究(陈晓冬等,2006;刘晓燕等,2007;卫万顺等,2010;徐明等,2010;任建喜等,2012;栾英波等,2013;刘鹏等,2016;周阳等,2018),取得了一定的成果。但关于关中盆地南部山前区域地热资源赋存规律、成因及应用研究程度相对较低。

本文总结了关中盆地地温场及地温梯度分布特征,探讨了关中盆地南部山前地热资源的来源。采用体积法计算了关中盆地南部山前地区地热单元储存的总热量,采用热流量法计算了高地温异常区的地热流体资源量。有针对性地提出了科学开发利用关中盆地山前地区地热资源的分区规划和建设。

2 研究区概述

2.1 范围

关中盆地南部山前地区指地热储层类型为构造断裂裂隙热储的区域,地理上位于盆地南部与秦岭山前的接壤地带,沿秦岭山前断裂呈条带状展布,范围涉及3市12县区,东西长约360 km,南北宽约5 km,面积约1812.46 km²(图1)。

2.2 自然地理

研究区地势南高北低,西高东低。南侧是峰峦叠障的秦岭中高山,走向近东西,山势陡峻。北部为山前洪积扇、黄土台塬、河谷阶地。洪积扇分布在秦岭北侧山前一带,单个洪积扇或相互连接,形成带状分布的洪积扇裙或山前倾斜洪积平原。黄土台塬宽度较窄,分布不连续,在秦岭断块降升幅度较大的地段,黄土台塬消失,常被洪积扇取代。河谷阶地属于渭河及其南岸支流阶地,南岸的支流阶地多发育右岸。

研究区属温带半干旱半湿润气候,年均降水量522.4~719.5 mm,年均气温12.9~13.5℃,冬季寒冷干燥,初雪日为11月下旬,终雪日为3月中旬。

2.3 水系

区内水系均属秦岭的渭河支流,受降水影响,河水位和流量变化很大,河水在流经山前砂砾质河床时大量渗漏,甚至断流,成为地下水的丰富补给源,主要支流为清姜河、汤峪河、黑河、涝河、泔河、产河、灞河、赤水河、零河等。

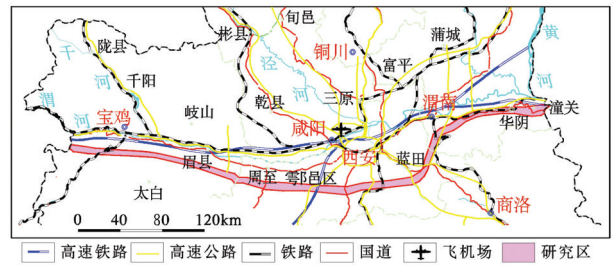


图1 研究区范围示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

2.4 地层

研究区地处华北板块西部之鄂尔多斯地块与秦岭造山带之间,出露地层由老到新有:太古宇(Ar)、元古宇(Pt)、古生界(Pz)、中生界(Mz)、新生界(Kz)(图2)。

2.5 政策支持

为推进陕西省供热领域的燃煤减量替代,提高区域供热能源利用效率和清洁化水平,改善空气质量,省委、省政府高度重视地热能开发利用工作。2018年1月,省住建厅等六部门联合印发了《关于发展地热能供热的实施意见》,要求健全完善陕西省地热能供热市场和工程技术体系,关中区域地热能成为重要供热方式,建设地热能供热规模化应用试点示范区3~5个,发展地热能供热800万m²以上。

2018年6月,省发改委、财政厅、自然资源厅、环保厅、住建厅等十个部门联合发了《陕西省冬季清洁取暖实施方案(2017—2021年)》指出,以关中区

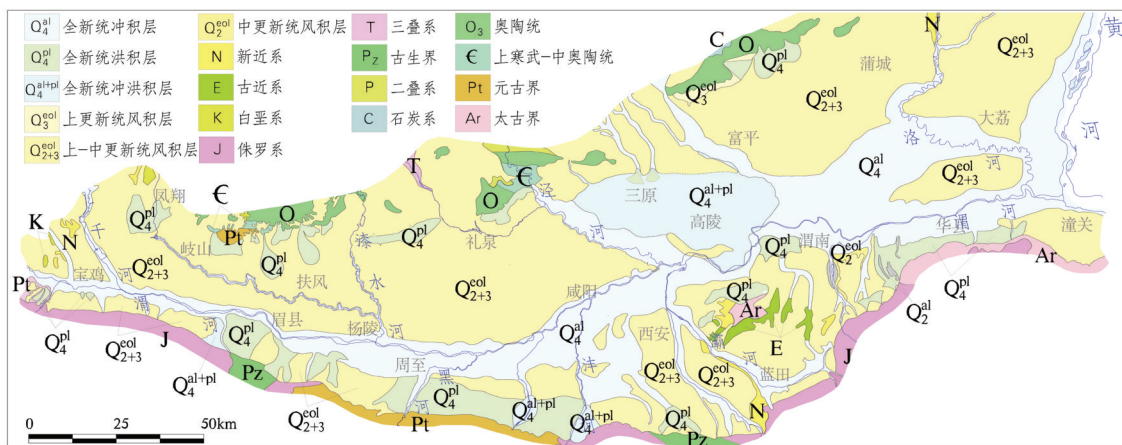


图2 第四纪地质图

Fig.2 Quaternary geological map

区为主,积极发展地热能供暖,提高地热能 在建筑中的应用比例。

这一系列支持政策针对性强、支持力度大、规范和促进了区域地热能开发利用。

2.6 开发利用情况

研究区内蓝田汤峪疗养院的热水井是陕西省第一眼地热井,成井于1972年。经历了20世纪90年代和近10年的两个发展高峰期,截至2017年底,关中盆地有地热井487眼,多分布在渭河河谷阶地区,南部山前地区的地热资源开发利用工程集中在西安东大、蓝田汤峪、眉县汤峪等,开发深度为1500~4000 m,利用方式由早期单一温泉浴疗,发展为供暖、生活饮用、养殖等多种用途。

2.7 存在的主要问题

目前关中盆地南部山前地热资源开发利用主要存在以下5个问题:(1)地热资源研究程度低、缺少总体开发利用规划,存在碎片化、无序化的问题,导致地热资源梯级开发难以实施,尚未形成综合循环利用模式;(2)目前地热资源开发程度总体较低,工程分布不均,主要集中分布于西安市东大镇、蓝田汤峪和眉县汤峪等地,在地方政府的管理下,整体趋势正在向环保生态型开发利用方向发展;(3)研究区地热水经过20余年的持续开采,造成西安市东大等集中开采地段的储层压力下降严重,导致部分地热井抽水量减少甚至废弃;(4)开发利用过程中,存在地热尾水回灌困难问题,导致地热水水位

下降,影响地热资源的可持续开采,造成这种现象的原因一是企业未按刚性参数需求,做到全部回灌,二是目前回灌技术研究不成熟;(5)企业追求利率最大化,非理性行为导致企业在地热资源开发利用过程中“只采不灌”,对地热资源产生“杀鸡取卵”式的破坏作用。

3 地热地质条件

3.1 构造特征

关中盆地是一个叠在燕山期隆起之上,喜山期陷落的断陷盆地。结合盆地内地球物理资料及莫霍面特征、断裂特征、沉积建造的厚度、基底岩相结构、地貌类型、沉降速率和构造特征等,可将关中盆地划分为6大构造单元19个小区。研究区涉及其中10个小区,分别为:宝鸡断凸、眉县浅凹;西安断凹、余下断阶;焦岱断阶、白鹿塬断阶、骊山凸起、渭南断阶、固市断凹、二华断阶(图3)。

3.1.1 宝鸡断凸

位于渭河断裂和秦岭北麓断裂之间,基底为印支期黑云母二长岩类侵入体,埋深300~500 m,上覆新近系上新统和第四系沉积。

3.1.2 眉县浅凹

位于乾县—富平断裂(北山山前断裂)和秦岭北麓断裂之间,基底为中古元古界变质岩类,靠近南部基地为花岗岩侵入体,埋藏深度约400~700 m,上覆新生界上新统和第四系沉积。

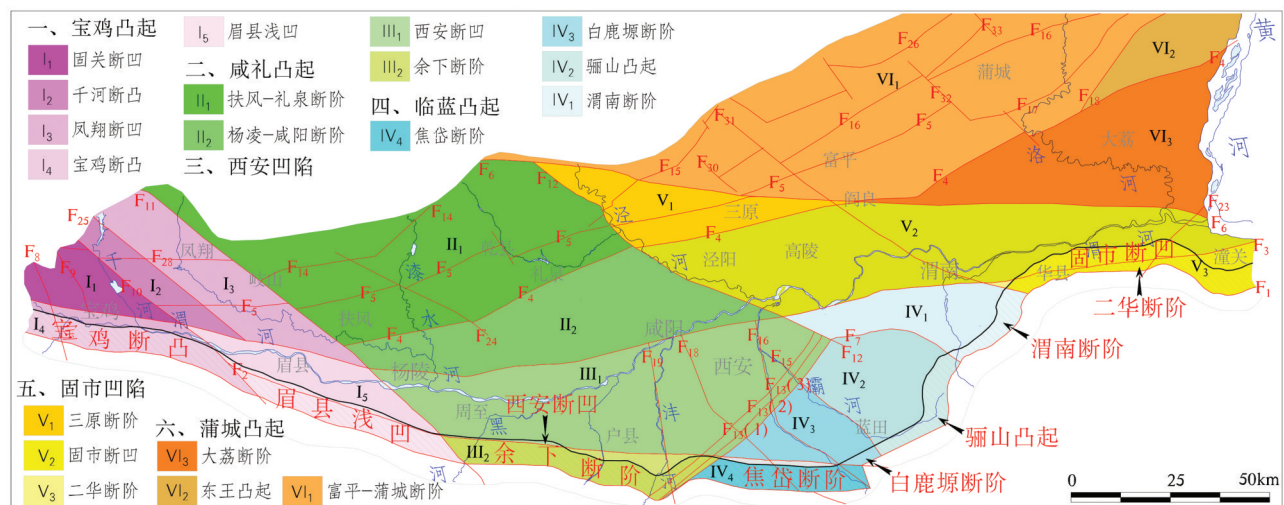


图3 区域构造图

Fig.3 Regional structure map

3.1.3 余下断阶

位于余下一铁炉子断裂与秦岭北麓断裂以北、临长断裂以西之间,即楼观台—余下之间山前地段。基底为古元古界—中元古界变质岩,因断层挫动,基地埋藏深度变化较大,最深处约4000 m,地层和基底总体向西安断凹中心倾斜。上覆地层主要为新生界新近系,其不整合超覆于古元古界—中元古界变质岩之上。

3.1.4 西安断凹

位于渭河断裂以南,余下一铁炉子断裂以北。基底为元古界变质岩,仅周至处为印支期花岗岩,其上不整合覆盖有新生代地层,其中以新近系为主,占总厚的60%以上,其次为古近系和第四系(图4)。古近系仅有始新统和渐新统沉积,缺失古新统,地层和基底总体向断凹中心倾斜。

3.1.5 焦岱断阶

位于余下一铁炉子断裂以南、秦岭北麓断裂以北、临长断裂以东的长条状区域。基底为太古界混合岩化的片麻岩类及燕山期侵入岩体,埋藏较浅,上覆地层为新生界,基底及上覆地层均向南缓倾。

3.1.6 白鹿塬断块

位于灞河断裂、长安—临潼断裂、余下一铁炉子断裂相交部位,基底为太古界混合岩化的片麻岩及燕山期侵入岩体,埋藏较浅,上覆地层为新生界,基底及上覆地层均向南缓倾。

3.1.7 骊山凸起

骊山凸起岩性主要为太古界混合岩化的片麻岩及燕山期侵入岩,基底及地层向南缓倾。

3.1.8 渭南断阶

位于渭河断裂以南、骊山北山断裂以北,基底为太古界变质岩,埋深2500~3500 m不等,近山前者浅,远山者深,其上覆新生界地层,新生界以新近系为主,其次为第四系和古近系,古近系缺失古新统,新近系超覆于太古宇之上。基底和地层总体向北微倾。

3.1.9 固市断凹

固市断凹基底主要为太古界变质岩,上覆地层以新近系为主,古近系和第四系次之,古近系缺失古新统,始新统超覆于太古界变质岩之上,基底和地层均向北缓倾。

3.1.10 二华断阶

位于渭河断裂和秦岭北麓断裂相夹的狭长地带,即华州区—潼关及其周边的区域。敷水—华阴断裂以南基底为太古界太华群及燕山期花岗岩,其上覆第四系秦川群,厚度400~500 m;敷水—华阴断裂以北基底为太古界变质岩,其上覆新生界古近系—第四系,埋深2000 m左右,古近系缺失古新统,基底和地层总体向北倾斜。

3.2 地热储层特征

关中盆地南部山前基底埋藏较浅,基底构造断裂地热储层沿秦岭北麓山前大断裂带分布。考虑地热资源储存条件,将研究区内的地热储层分成四个地段:第一段由宝鸡南侧的石坝河至周至的马召,第二段由周至马召至长安东大街办,第三段由长安东大至华州区瓜坡镇,第四段由华州区瓜坡镇至潼关太要(表1)。

3.3 地温场及大地热流值

3.3.1 地温场特征

研究区内近地表(20 m)地温场大致相同,地温值为15℃左右,西安东大、宝鸡温水沟地区由于断裂直接导通地表,地温值大于17℃。

研究区深度1500 m处地温场呈中部高,东西

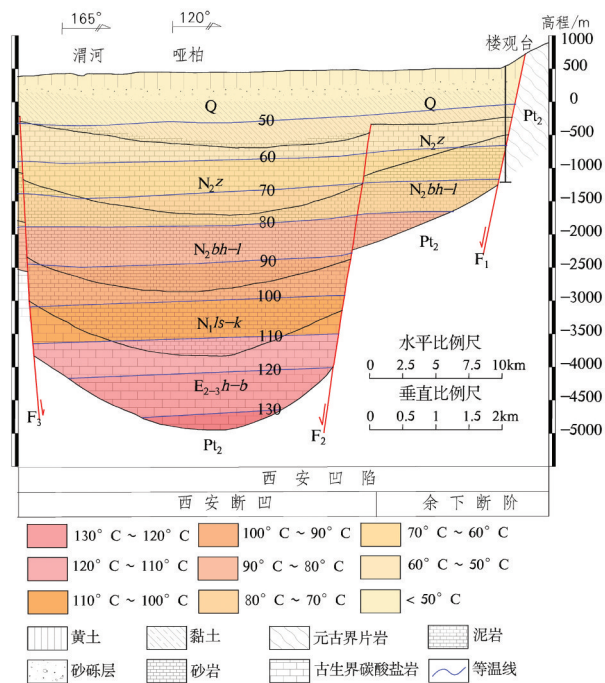


图4 西安凹陷地质构造综合剖面图
Fig.4 Comprehensive section of geological structure in Xi'an Depression

低的规律。西安凹陷和临蓝凸起的华州区处1500 m地温均大于60℃,其中西安凹陷的西安断凹、焦岱断阶、余下断阶部分区域1500 m处地温大于70℃,而宝鸡凸起、临蓝凸起的潼关县1500 m处地温小于60℃。

3.3.2 地温梯度分布特征

研究区的地热梯度值为3℃/100 m左右,西安

凹陷的余下断阶、固市凹陷的二华断阶、临蓝凸起的渭南断阶的地温梯度值相对较大,大于3℃/100 m;固市凹陷的潼关县及宝鸡凸起的地温梯度值相对较小,小于3℃/100m。

3.3.3 大地热流值特征

关中盆地南部山前地区的大地热流值差异较大(表2)。华阴市(80.15 mW/m²、79.82 mW/m²)、华

表1 构造断裂热储特征分段
Table 1 The features of structural fracture heat storage

地段	构造及主要断裂	岩性	出露温泉特征	热储特征
一	位于宝鸡凸起南部,西部为温水沟小断阶,东部为眉县小断隆。秦岭山前大断裂(F ₁)、金陵河断裂(F ₁₀)、千河断裂(F ₉)、固关—阳平镇断裂(F ₈)、陇县—马召断裂(F ₁₁ 即哑柏断裂)	西部基底为中元古界变质岩,上覆下白垩统砂砾岩及新近系、第四系粉质粘土夹砂砾石层,基底埋深500 m;东部200 m以浅为山前冲洪积物,200 m以深基底为中元古界变质岩	宝鸡市温水沟泉,出露于印支期花岗岩中,水温30℃,流量约10 m ³ /h,化学类型为HCO ₃ ⁻ ·Na·Ca型	构造断裂裂隙热储,埋深约500 m,热储岩性为中元古界宽坪群云母石英片岩
二	位于西安凹陷的南部。秦岭北麓断裂(F ₁)、余下一铁炉子断裂(F ₂)、另外沔河断裂(F ₁₉)、临潼—长安断裂(F ₁₃)在东大先后与F ₂ 、F ₁ 交汇	周至一带新生界沉积厚度最大达7000 m,向南至秦岭山前为1000 m左右。山前地带900 m以浅为第四系冲洪积砂砾卵石,900~1000 m为新近系中细砂岩夹薄层泥岩;基底为中元古界变质岩,在1100~1300 m可钻遇秦岭山前断裂破碎带	凤泉汤位于眉县汤峪,出露于中元古界宽坪群与印支期花岗岩接触带,水温60℃,流量16.5 m ³ /h,化学类型为SO ₄ ⁻ ·Na型,矿化度576 mg/L	构造断裂裂隙热储,埋深约1000 m,热储岩性为宽坪群变质岩、印支期花岗岩
三	位于临蓝凸起。秦岭北麓断裂(F ₁)、余下一铁炉子断裂(F ₂)、泾河断裂(F ₁₆)、灞河断裂(F ₁₅)、泾河—骊山断裂(F ₁₂)、临潼—长安断裂(F ₁₃)、骊山北侧断裂(F ₇)	基底为燕山期花岗岩与太古界太华群,呈侵入接触。其上为古近系和新近系中细砂岩及砂砾岩。基底埋深起伏大,在蓝田汤峪为450 m,灞河谷地达1000 m左右	石门汤位于蓝田汤峪,出露于中元古界宽坪群与燕山期花岗岩接触带,水温49~58℃,流量约10.8 m ³ /h,化学类型为SO ₄ ⁻ ·Na型,矿化度620 mg/L	构造断裂裂隙热储,在临潼骊山地区热储岩性为太古界太华群变质岩
四	位于固市凹陷南部边缘。秦岭北麓断裂(F ₁)、渭河大断裂(F ₃)、禹门口—华州区断裂(F ₃₁)、孟源—永济断裂(F ₂₃)	基底为太古界太华群变质岩及燕山期花岗岩,其上为新近系砂砾岩及第四系冲洪积层。基底埋深500 m左右		构造断裂裂隙热储,热储岩性为太古界太华群变质岩、燕山期花岗岩

表2 大地热流值计算成果

Table 2 The calculation table of the earth heat flow values

	位置	测试段/m	热导率/(W/m·K)	地温梯度/(℃/100m)	地温梯度/(K/km)	大地热流值/(mW/m ²)
实 测	渭南市华阴市	1800~2805	2.89	4.11	27.73	80.15
	渭南市华阴市	2055~2584	2.89	3.07	27.62	79.82
	渭南市华州区	1000~1401	2.0	4.41	27.76	55.52
	西安市临潼区	1599~2017	2.01	3.09	27.62	55.52
	西安市鄠邑区	1400~1600	2.42*	3.84	27.70	67.03
收 集	西安市周至县(汪集旻等,1990)	2100~4700				61
	西安市长安区(汪集旻等,1990)					68
	渭南市临渭区(汪集旻等,1990)					67
	西安市鄠邑区(胡圣标等,2011)	475~900	2.4±0.3		31.9±0.5	77.5

注:*号表示热导率采用经验值,其余均为实测值。

州区(55.52 mW/m²)、临潼区(55.56 mW/m²)、鄠邑区(67.03 mW/m²、77.5mW/m²)、周至县(61 mW/m²)、长安区(68 mW/m²) (周阳等, 2017)与《中国大陆地区大地热流数据汇编》(胡圣标等, 2011)中全国平均值((61±15.5) mW/m²)及西北地区大地热流平均值((60.9±15.5) mW/m²)进行对比后,认为研究区整体属于中低温地热田,局部地区地热资源丰富,具备优良的开发前景。

3.4 地热流体

3.4.1 地热流体分布及赋存

按地热储层特征,将关中盆地南部山前地区的地热流体分为四个地段。

第一段,由宝鸡南侧的石坝河至周至县的马召镇。这一段地热流体储存空间有限,在秦岭北麓断裂与北西向断裂构造复合部位,多有温泉出露,如宝鸡温水沟,水温32℃,流量18 m³/h,为HCO₃-Na·Ca型水,矿化度328.8 mg/L;眉县西汤峪,水温60℃,流量16.6 m³/h,为SO₄-Na型水,矿化度576 mg/L。

第二段,由周至县马召镇至长安区东大。向秦岭北麓方向新生界厚度逐渐变薄,风化裂隙发育,在1100~1300 m可钻遇秦岭北麓断裂破碎带,为地热流体的储存和运移提供了较好的条件,单井出水量40 m³/h左右,井口温度55℃左右。

第三段,由长安区东大至华州区瓜坡镇。地势起伏相对较大,河谷切割深,地热流体储存和运移条件差异较大,单井出水量10~70 m³/h,井口温度40~70℃。局部有温泉出露,如蓝田汤峪温泉,水温49~58℃,流量10.8 m³/h,为SO₄-Na型水,矿化度620 mg/L。

第四段,由华州区瓜坡镇至潼关县太要镇。目前该地区地热开发程度低,资料较少。在华阴市051基地内有2眼地热井WR04和R1,WR04井的水温105℃,出水量242.28 m³/h,矿化度31.91 g/L;R1井的水温100℃,出水量136.37 m³/h,矿化度32.37 g/L,为Cl-Na·Ca型水。

3.4.2 地热流体赋存和分布的影响因素

关中盆地南部山前地区构造断裂型热储地热流体与盆地内相比,具有温度高,流量小的特点。

(1) 开采段埋深

对地热井单井出水量的分析表明,出水量与开

采段埋深具有较好的相关关系。开采段埋深小于3000 m时,出水量随着埋深的增大而逐渐增大;大于3000 m时,井的出水量则随埋深增大而逐渐减小。

(2) 砂层厚度

对地热井的单位降深单位开采段出水量与砂厚比的分析表明,二者呈正相关关系,即开采段的砂厚比越大,单位降深单位开采段出水量就越大,储层就能赋存更多的地热水,即赋存的地热水资源就越多。

(3) 断裂构造

在秦岭山前地区,断裂带对地热流体的分布和赋存有一定的控制作用,往往是地下热水运移的通道,在灰岩、碎屑岩及各类变质岩中,断裂带、破碎带使岩石的完整性和连续性受到破坏,岩石渗透性能增加,往往成为富水地段。

4 地热资源成因及资源量评价

4.1 地热资源形成模式

4.1.1 热源成因

关中盆地山前地区地热资源主要来自于地球的内部热能,深部热能向上覆巨厚的新生界沉积层扩散,其扩散速率与岩石的热阻率呈反相关关系,在断裂处可通过构造的贯通向浅部快速传递。

其次为地壳中放射性元素衰变以及矿物转化过程中产生的热能。喜马拉雅—燕山时期形成的大量酸性花岗岩中的同位素²³⁸U衰变可以产生大量热,放射性元素在衰变期内产生的氦气的富集可支持该结论。成岩作用中蒙脱石向伊利石转化也会产生热能,该过程在研究区中部、东部的西安凹陷和固市凹陷普遍存在。此外,少量生物降解产生的能量是区域地热资源的补充能源。

研究区的地热流体运移和储存空间比较复杂,既有新生界的孔隙裂隙,也有基岩的构造裂隙和风化裂隙,主要受构造断裂的影响。秦岭北麓断裂是构成盆地与山地的边界断裂,属活动性断裂,沿着断裂带构造裂隙、节理及风化裂隙发育,为地热流体赋存及传导提供条件,秦岭北麓地热资源的形成模式可以分为热传导型和热对流型两类。岩层内的热传导以垂向扩散热能为主,在具有与深部高温部位导作用的深断裂附近,可形成沿断裂方向的热对流。

4.1.2 热传导型

热传导型地热资源是区内地热资源的基础,完整地质体内地热资源的形成模式均是热传导型,平面上呈块状分布。热能由深部热源向地表扩散,以相对均匀的热传导方式向上运移,该过程仅仅是热能储量的交换,没有传热介质的运移。在局部地区,由于地层岩性导热系数、导温系数的差异,造成地温差异。

4.1.3 热对流型

深大断裂的开放性为深部热源向上传输热能提供了通道,深部热能被介质携带,沿断裂向地表运移,流出地表时,形成地表温泉。根据介质运移的方向不同可分为垂向热对流型和水平热对流型两类。

垂向热对流型分布在秦岭北麓断裂(F_1)及其他断裂(余下一铁炉子断裂(F_2)、陇县—马召断裂(F_{11})、临潼—长安断裂(F_{13})等)交汇处,在深部高温、高压的驱动下,水介质携带深部热量可以沿着断裂迅速运移,表现为该区域地温梯度偏高:秦岭北麓断裂为一南升北降、垂直断距达10 km以上呈左旋扭动的正断层,其断裂带岩石破碎,含热介质向地表运移,形成温泉或地温异常,如东大地区200 m地热井可获得30℃以上的地热流体温度,地温梯度在5℃/100 m左右;北东向的临潼—长安断裂为一组相互平行的3条断裂组成的断裂带,属张性断裂,破碎带宽,断裂西南端与秦岭北麓断裂交汇处的东大和草堂均地温异常,如东大镇某井深356.06 m的地热井,井口水温达54℃;北西向的司街—益门断裂为张扭性断裂,其与秦岭北麓断裂交汇处的宝鸡温水沟地温异常;近东西向的余下一铁炉子断裂断距达4 km以上,其与秦岭北麓断裂交汇处的蓝田汤峪地温异常。渭南市华州区、华阴市的地温异常也与当地的断裂交汇活动有关。

水平热对流型的地热资源主要分布在深大断裂的旁侧。热能在深大断裂垂向对流的过程中,由于上部通道不畅或断裂旁侧有空隙、裂隙发育的水平岩层,热介质转以水平方向对流,形成深大断裂附近一定范围的地热异常区,但受断裂带垂向热对流的强度、断裂带的开放程度、断裂带附近岩层的空隙发育程度等因素影响,水平对流的延伸范围差异较大。在平面上常显示为沿断裂带呈串珠状或

带状分布的地热异常区。秦岭北麓的东大、子午草堂寺等地段,沿断裂上升的热能未能溢出地表,沿水平途径进入第四系松散层,形成了沿断裂带呈串珠状分布的浅埋热异常地段。

4.2 区域地热资源量

4.2.1 计算原则

本次计算不考虑水运移产生的热量运输,把水和固体介质看成一个整体传热系统,且是均质、各向同性,即传热方式是热量均匀地由下向上传导的。同时认为每个热储单元是一个独立封闭系统,水平方向同一深度上地温相同,无热量交换,单元侧向周边边界看成零热量交换边界(隔热边界),垂直方向不同深度上热流由下向上均匀传导。

4.2.2 计算方法

使用体积法计算关中盆地南部山前热储层体积内储存的总热量,计算的上边界为恒温层,下边界是基底接触面。计算公式如下:

$$Q = AHC_v(T_p - T_c) \times 10^6$$

式中: Q 是热量(kcal); A 是热储面积(km^2); H 是热储层平均厚度(m); C_v 是热储层体积比热容($\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{℃}$); T_p 是热储层平均温度($^{\circ}\text{C}$); T_c 是基准温度,即当地地下恒温层温度或多年平均气温($^{\circ}\text{C}$),本文所用温度为15℃。

4.2.3 资源量

关中盆地南部山前地区地热单元储存的总热量为 2.69×10^{17} kcal,相当于标准煤 3.85×10^{10} t(表3)。若按标准煤450元/t的价格计算,假设研究区地热资源100%利用时,可节约煤炭成本约17.33万亿元。

4000 m以深暂难利用的热量是 1.10×10^{17} kcal,

表3 地热资源量计算

Table 3 The calculation table of geothermal resources

构造	面积/ km^2	计算深度/m	资源量/ (10^{15}kcal)	折标煤/ (10^4t)
二华断阶	371.25	4000	86.45	12.35
固市断阶		4000~6000	106.07	15.15
渭南断阶	127.94	2500	10.85	1.55
+白鹿塬断阶	253.34	2000	14.96	2.14
焦岱断阶		2500	34.83	4.98
余下断阶	381.65	2500	34.83	4.98
西安断凹	16.61	4000	3.31	0.47
		4000~6000	4.09	0.58
眉县浅凹	661.67	1000	8.57	1.22
+宝鸡断凸				
合计	1812.46		269.12	38.45

相当于标准煤 1.58×10^{10} t, 占总热量 40.93%; 4000 m 以浅能开采利用的热量 1.59×10^{17} kcal, 相当于标准煤 2.27×10^{10} t, 占总热量 59.07%。

4.3 高地温异常区地热流体资源量

地热流体按照其所赋存的储层孔隙性质认为是山前基岩裂隙型地热流体, 储层孔隙连通性变化较大, 流体在其中运移复杂, 静储量法、补给量法评价均有难度。热流量法适用于隆起山地对流型地热资源的评价, 通过对温泉或地热井的流量来对其放热量进行计算, 因此本文以热流量法评价研究区基岩构造裂隙型热储的地热流体资源量。高地温异常区主要分布在宝鸡温水沟、眉县汤浴、蓝田汤浴和西安东大, 以下分别论述。

4.3.1 宝鸡温水沟

宝鸡温水沟 9 处泉眼的实测流量在 1972 年 4 月为 $18.0 \text{ m}^3/\text{h}$, 2006 年 4 月 26 日的实测汇水总量为 $18.187 \text{ m}^3/\text{h}$, 与 1972 年的实测流量、水温及水化学比较, 彼此基本一致, 说明其水热动态稳定, 该值 ($0.043 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 作为地热流体资源比较可靠。

4.3.2 眉县汤浴

眉县西汤浴温泉自流量为 $16.67 \text{ m}^3/\text{h}$, 自 20 世纪 80 年代中后期以来, 由于周边施工多眼地热井, 泉水已不自流, 现在水位距地表 7 m 左右, 据近几年记载, 水位随供水量大小略有升降, 根据调查结果, 这一地区的目前采水量为 $17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ($0.047 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。

4.3.3 蓝田汤浴

蓝田东汤浴区段 90 年代泉水已不能自流, 泉水水位埋深约 6 m, 据常年观测资料, 基本稳定, 略呈缓慢下降趋势。20 世纪 90 年代区内增加 3 眼热水井, 取水量大幅增加 (90 年代初均值为 $17.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 1991 年达到 $18.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$), 之后逐渐控制开采

量, 取水量有所下降 (2007 年降为 $7.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$), 在冬季泉水用泵已经无法抽取热水, 显示已超过补给能力。因此, 以 90 年代的 $17.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ ($0.048 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 作为开采资源量。

4.3.4 西安东大

西安东大地区是地热资源相对富集的地区, 地热资源的开发利用已有 30 余年的历史, 最初以开采浅部第四系热储层为主, 而后新井多开采更深的新近系热储层, 水温相对较高, 主要用于洗浴、供暖、养殖等方面 (杨立中等, 2017)。据陕西省地质调查院研究成果, 区域内单井出水量 $10 \sim 70 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

5 开发应用

5.1 开发利用区划

开发利用区划以地热地质构造单元为基础。依据单位面积地热资源量的大小, 参考研究区内 4 个高地温异常区 (即主要开采区) 的水位变化情况, 将研究区的地热资源开发利用区划分为 4 类: 鼓励开采区、保持开采区、一般开采区和限制开采区 (图 5)。

5.1.1 鼓励开采区

包括余下断阶 (除东大镇)、西安断凹、渭南断阶、白鹿塬断阶、渭南断阶和二华断阶等。这些区域单位面积内地热资源量丰富, 地热水位基本稳定, 开采热储层为断裂裂隙水, 具有较强的补给能力。目前开发程度较低, 井数较少, 采水量小, 具备良好的开发利用前景。建议做好地热开发产业布局, 优化资源配置。

5.1.2 保持开采区

焦岱断阶 (除蓝田汤浴)。地热资源量较丰富, 也是关中盆地最早直接利用地热资源的区域, 地热资源需求较大, 历年开采已经引起区内热流体水位



图 5 地热资源开发利用区划图

Fig. 5 Development and utilization zoning map of geothermal resources

下降,但是由于可以获得沿着深大断裂的浅循环水补给,具有较好的补给能力,维持现状的开采基本可以满足当地的需求。在保证不引起水位持续下降条件下,建议适量增大地热资源开采力度,同时加强技术研发,积极引进先进工艺,提高地热利用能效及管理水平。

5.1.3 一般开采区

包括宝鸡凸起的宝鸡断凸和眉县浅凹(除眉县汤峪)。该地区单位面积内地热资源量较少,开发程度较低,目前已有的工程集中在宝鸡市温水沟一带,区域地热资料较少。建议地热项目实施前,做好前期勘查工作,降低投资风险。

5.1.4 限制开采区

指西安东大、眉县汤峪和蓝田汤峪。该地区地热资源开发程度高,持续开采已经引起地热流体水头的反复升降,提示该区域地热资源的开采量过大或已接近饱和,为保障区域地热资源的可持续利用,建议限制开采地热资源,同时加强政府监管。

5.2 地热资源利用方向

以习近平生态文明思想为指导,坚持统一规划、科学勘查、合理开发的原则,在加大生态环境保护与改善的前提下,优化地热勘查开发与保护利用的规划布局,实现多规合一,加强政府管控,推进地热资源节约、集约利用,实现地热资源可持续利用和经济效益、社会效益、资源环境效益三统一。

5.2.1 地热能供暖

秦岭山前地热资源属于中、低温热水资源,区内地热井水温在40~90℃,具备地热供暖的良好条件。目前缺乏地热水开发利用的统一管理,建议在利用地热能供暖时,采取梯级利用、多能互补(以地热能为基础负荷,电能或天然气提供调峰负荷)、集中开发、分片供给的方案,避免过度开采。供暖对象包括集中住宅区、休闲会议中心、体育基地、农业温室大棚等,也可以建设地热利用为主体的特色小镇。

5.2.2 地热水资源矿物质的利用

区内地下热水富含氟、偏硅酸、偏硼酸、碘、溴等微量组分,部分热水中的氟及偏硅酸达到了命名矿水的浓度,属于较好的复合性医疗热矿水。地热水洗浴投资少,管理简单,经济效益明显,对医疗价值高的地热水进行重点开发,建立综合性的温泉、疗养、度假、旅游基地,拉动当地关联性产业。

5.2.3 种养加一体化全产业链生态循环农业

利用地热资源辅助农业生产,是一种提高农业、花卉种植效率的清洁、环保、节能的生产模式。该模式可以降低供暖运行成本,减少燃煤带来的资源浪费及环境污染,还可以提前培育生长期较长的农副业作物,错开上市高峰期。如果得到规模化、集约化的推广,将会提高冬季农业生产力,增加农民收入,丰富冬季蔬果市场,带来较高的经济效益和广泛的社会效益。

地热水产养殖是地热直接利用的重要方式,随着人们生活水平的增高,对各种鱼类的需求增长,地热水产养殖前景广阔。在地热资源条件好的地区,扩大养殖规模,形成养殖基地,增加养殖品种。用现代化手段进行地热水高密度水产科学养殖,缩短养殖周期,拉长水产养殖的产业链,增添必要的配套设施,如排放水净化系统,使人们食用的放心。

5.2.4 地热水伴生资源综合利用

根据地质调查和前人研究,发现关中盆地地热水伴生有较高含量的氦气和甲烷气,大部分地热水伴生的水溶He气含量为1.0%~1.5%,远远超过He气工业开发指标(0.3%),地热水水溶He气达到工业开发所需的含量。热水伴生的甲烷气一般含量为10%~15%,其中西安凹陷和固市凹陷地热异常区存在He气和甲烷气富集区域,具有伴生气勘探开发和综合利用前景(李荣西等,2009;刘建朝等,2009)。

6 结 论

关中盆地南部山前地区的自然地理条件多样,地质构造单元和区域地热储存条件复杂,根据区域内近地表处(20 m)、1500 m处、地温梯度以及大地热流值分布情况,将关中盆地南部山前地区的地热流体按赋存特征分为四个地段,每一地段的地热特征不同。

研究了地热资源成因类型和传导方式。利用体积法估算了关中盆地南部山前地区地热单元储存的总热量和4000 m以深及以浅的地热资源量。利用热流量法计算了宝鸡温水沟、眉县汤峪、蓝田汤峪、华清池和西安东大等高地温异常区的地热流体资源量。根据地热资源赋存规律和开发利用现状,划分了地热资源区类型。秦岭山前地热资源属于中、低温热水资源,适合于直接利用,如地热采

暖、洗浴、养殖等,开发利用前景良好,为区域地热资源的科学、长期利用开发提供理论依据。

References

- Chen Xiaodong, Jin Xu, Guan Yanwu, Shi Zhuo, Gao Yi. 2006. The influence of daily and annual variation of the surface temperature on near-surface temperature survey[J]. *Progress in geophysics*, 21(3): 1008–1011 (in Chinese with English abstract).
- He Zhiliang, Feng Jianyun, Zhang Ying, Li Pengwei. 2017. A tentative discussion on an evaluation system of geothermal unit ranking and classification in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 168–179 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2001. Completion of heat flow data in the China continental area(3rd edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(5): 611–623 (in Chinese with English abstract).
- Jia Lingzhu, Zhong Ren, Zhang Yubao, Jian Derong. 2012. Prospect analysis of medium low temperature geothermal resource of Xizhang Area [J]. *Northwestern Geology*, 41(2): 106–114 (in Chinese with English abstract).
- Li Gongke, Wang Weixing, Li Hong, Yang Fengtian, Wang Linhai, Fang Wanling. 2014. Temperature distribution and controlling factors of the Tangquan geothermal field in Hebei Province[J]. *Geology in China*, 41(6): 2099–2109 (in Chinese with English abstract).
- Li Gongke, Wang Weixing, Yang Fengtian, Li Hong, Shen Jian, Dong Lu-yang. 2015. Genesis model of the Tangquan geothermal field in Hebei Province[J]. *Geoscience*, 29(1): 220–228 (in Chinese with English abstract).
- Li Rongxi, Liu Jianchao, Wei Gangfeng, Zhao Fasuo. 2009. Origin and source of dissolved hydrocarbon gas in geothermal water, Weihe Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 20(5): 774–780 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiucheng, Ma Zhiyuan, Zhang Xuelian, Guo Sen, Meng Yang, Dang Shusheng. 2016. Genetic model of the Dongda geothermal field in Guanzhong Basin, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 43(6): 2082–2091 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40(1): 312–321 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianchao, Li Rongxi, Wei Gangfeng, Zhao Fasuo. 2009. Origin and source of soluble helium gas in geothermal water, Weihe Basin[J]. *Geological Science and Technology Information*, 28(6): 84–88 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kai, Wang Shanshan, Sun Ying, Cui Wenjun, Zhu Deli. 2017. Characteristics and regionalization of geothermal resources in Beijing[J]. *Geology in China*, 44(6): 1128–1139 (in Chinese with English abstract).
- Liu Peng, Yan Changhong, Xu Yang, Zou Mingyang, Zhou Yinkang. 2016. Laboratory research on influence factors of thermal conductivity for Xiashu Loess in the area of Nanjing[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 36(5): 847–852 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wentong, Xu Delun, Hou Wei, Song Shan. 1994. Study on seafloor thermal diffusivity and constant temperature depth in the central Bohai Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 36(4): 485–491 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wentong, Xu Delun, Wang Zhenglin, Song Shan, Wu Shuli. 1995. Variation of temperature and mud temperature phase with depth in the central seabed of the Bohai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(5): 460–465 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoyan, Zhao Jun, Shi Cheng, Zhao Bo. 2007. Study on temperature and depth of soil constant temperature layer[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 28(5): 494–498 (in Chinese with English abstract).
- Luan Yingbo, Zheng Guisen, Wei Wanshun. 2013. The experimental study of the factors affecting the rate of thermal conductivity of silty clay in Beijing plain[J]. *Geology in China*, 40(3): 981–988 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jianxi, Liu Jiahui, Gao Huiyan, Yang Zhiguo, Zhou Xiaoyan, Gao Ting-ting. 2012. Study on distribution law and observation of ground temperature in spring along Xi'an subway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 29(3): 101–106 (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 Jiyang, Huang Shaopeng. 1990. Compilation of geothermal heat data in mainland China (Second Edition) [J]. *Seismology and Geology*, 12(4): 351–363, 366 (in Chinese with English abstract).
- Wei Wanshun, Zheng Guisen, Luan Yingbo. 2010. Characteristics and influencing factors of the shallow geothermal field in Beijing plain area[J]. *Geology in China*, 37(6): 1733–1739 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ming, Zhao Ping, Zhu Chuanqing. 2010. Borehole temperature logging and terrestrial heat flow distribution in Jianghan Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 5(1): 317–323 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yan, Zhang Di, Zhao Guochun, Chen Siyu, Wang Xu. 2017. Distribution characteristics and potential evaluation of geothermal resources in Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 31(10): 51–57 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, Wang Andong, Wan Jianjun. 2017. On deployment of high-temperature deep geothermal wells in typical areas with hot dry rock potential in China[J]. *Geology and Exploration*, 61(2): 355–360 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(6): 1087-1102(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jichang, SongHebin, GaoPengfei. 1994. A study on geothermal resource in Daqing-Harbin Region[J]. *Acta Geoscientica Sinica* 16 (S1): 168-176(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhen, Yu Piao Luo, Chen Huijuan, Luo Yinfei, Zhao Dongyang, Bian Jiang. 2015. Genetic analysis and resource evaluation of the Xining geothermal field in Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 42(3): 803-810 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yang, Li Feng, Yan Wenzhong, Mu Genxu, Liu Jianqiang. 2016. Research on shallow geothermal energy resources occurrence rule of major cities in Guanzhong basin[J]. *Geological Survey of China*, 3(4): 12-18(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yang, Mu Genxu, Zhang Hui, Wang Ke, Liu Jianqiang, Zhang Yage. 2017. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin[J]. *Geology in China*, 44 (5): 1017-1026(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yang, Mu Genxu, Liu Jianqiang, Zhang Hui, Zhang Le, Jin Guang, Gao Haifeng. 2018. Research on shallow geothermal energy resources occurrence regularity of typical geomorphological unit[J]. *Geological Science and Technology Information*, 37(4): 238-244, 268 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yang, Zhang Hui, Gui Zhongqiang, Wang Ke, Zhang Yage. 2018. Study on Influencing Factors of Comprehensive Thermal Conductivity of Rock and Soil[J]. *Geological Survey of China*, 5 (1): 89-94 (in Chinese with English abstract).
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 40(1): 312-321.
- 刘建朝, 李荣西, 魏刚峰, 赵法锁. 2009. 渭河盆地地热水水溶氨气成因与来源研究[J]. *地质科技情报*, 28(6): 84-88.
- 刘凯, 王珊珊, 孙颖, 崔文君, 朱德莉. 2017. 北京地区地热资源特征与区划研究[J]. *中国地质*, 44(6): 1128-1139.
- 刘鹏, 阎长虹, 徐杨, 邹明阳, 周殷康等. 2016. 南京地区下蜀土导热系数影响因素室内试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 36(5): 847-852.
- 刘文通, 徐德伦, 候伟, 宋珊. 1994. 渤海中部海域海底热扩散率及恒温层深度研究[J]. *青岛海洋大学学报*, 36(4): 485-491.
- 刘文通, 徐德伦, 王正林, 宋珊, 吴述礼. 1995. 渤海中部海底恒温层温度及泥温相位随深度变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 26 (5): 460-465.
- 刘晓燕, 赵军, 石成, 赵波. 2007. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. *太阳能学报*, 28 (5): 494-498.
- 栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 2013. 北京平原区粉质黏土导热系数影响因素实验研究[J]. *中国地质*, 40(3): 981-988.
- 任建喜, 刘嘉辉, 高虎艳, 杨智国, 周晓燕, 高廷廷. 2012. 西安地铁沿线地层地温春季分布规律观测研究[J]. *铁道工程学报*, 29 (3): 101-106.
- 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.
- 汪集咏, 黄少鹏. 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J]. *地震地质*, 12(4): 351-363, 366.
- 卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 2010. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. *中国地质*, 37(6): 1733-1739.
- 徐明, 赵平, 朱传庆. 2010. 江汉盆地钻井地温测量和大地热流分布[J]. *地质科学*, 45(1): 317-323.
- 闫岩, 张迪, 赵国春, 陈思雨, 汪旭. 2017. 内蒙古自治区地热资源分布特征与潜力评价[J]. *干旱区资源与环境*, 31(10): 51-57.
- 杨立中, 孙占学, 刘金辉, 王安东, 万建军. 2017. 中国典型干热岩潜力区的地热深井部署[J]. *地质与勘探*, 61(2): 355-360.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地地质特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1087-1102.
- 赵继昌, 宋鹤彬, 高鹏飞. 1994. 大庆—哈尔滨地段地热资源研究[J]. *地球学报*, 16(增刊1): 168-176.
- 赵振, 于漂罗, 陈惠娟, 罗银飞, 赵东阳, 边疆. 2015. 青海省西宁地热田成因分析及资源评价[J]. *中国地质*, 42(3): 803-810.
- 周阳, 李锋, 闫文中, 穆根霄, 刘建强. 2016. 关中盆地主要城市浅层地热能资源量赋存规律研究[J]. *中国地质调查*, 3(4): 12-18.
- 周阳, 穆根霄, 张卉, 王克, 刘建强, 张亚鸽. 2017. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J]. *中国地质*, 44(5): 1017-1026.
- 周阳, 穆根霄, 刘建强, 张卉, 张乐, 金光. 2018. 典型地貌单元浅层地热能资源量赋存规律研究[J]. *地质科技情报*, 37(4): 238-244, 268.
- 周阳, 张卉, 桂忠强, 王克, 张亚鸽. 2018. 岩土体综合导热系数影响因素研究[J]. *中国地质调查*, 5(1): 89-94.

附中文参考文献

- 陈晓冬, 金旭, 管彦武, 石卓, 高艺. 2006. 长春地区地表温度日变、年变对地温测量的影响[J]. *地球物理学进展*, 21(3): 1008-1011.
- 何治亮, 冯建赞, 张英, 李朋威. 2017. 试论中国地热单元分级分类评价体系[J]. *地学前缘*, 24(3): 168-179.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集咏. 2011. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. *地球物理学报*, 44(5): 611-623.
- 贾林柱, 钟仁, 张玉宝, 菅德荣. 2012. 西张地区中低温地热资源利用前景分析[J]. *西北地质*, 41(2): 106-114.
- 李攻科, 王卫星, 李宏, 杨峰田, 王林海, 房万嶺. 2014. 河北汤泉地热田地温场分布及其控制因素研究[J]. *中国地质*, 41(6): 2099-2109.
- 李攻科, 王卫星, 杨峰田, 李宏, 沈键, 董路阳. 2015. 河北遵化汤泉地热田成因模式[J]. *现代地质*, 29(1): 220-228.
- 李荣西, 刘建朝, 魏刚峰, 赵法锁. 2009. 渭河盆地地热水水溶氨类天然气成因与来源研究[J]. *天然气地球科学*, 20(5): 774-780.
- 李修成, 马致远, 张雪莲, 郭森, 孟阳, 党书生. 2016. 陕西省关中盆地东大地热田成因机制分析[J]. *中国地质*, 43(6): 2082-2091.