

地热资源潜力评价

——以鄂尔多斯盆地部分地级市和重点层位为例

刘润川¹, 任战利^{1,2*}, 叶汉青³, 任文波¹, 王 琨¹, 淮银超¹, 祁 凯¹
LIU Runchuan¹, REN Zhanli^{1,2*}, YE Hanqing³, REN Wenbo¹, WANG Kun¹, HUAI Yinchao¹, QI Kai¹

1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;
 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;
 3. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029
1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;
2. State Key Laboratory for Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, 710069, Shaanxi, China;
3. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

摘要:针对鄂尔多斯盆地地热资源储量认识不统一、浅层地热能开发方式不明确、地热资源有利层位及有利区划定有分歧的3个问题,采用不同的评价方法分别对鄂尔多斯盆地水热型地热资源、浅层地热能 and 干热岩型地热资源进行了潜力和远景评估,结合地热资源的开发利用方式和效益对鄂尔多斯盆地的地热资源进行了综合分析。分析结果表明,鄂尔多斯盆地地热资源相对丰富,盆地内部分层位水热型地热资源量折合标准煤 249.4×10^8 t, 地热资源年可开采量折合标准煤 748.1×10^4 t; 7个地级以上城市浅层地热能资源年可开采量折合标准煤 281.2×10^4 t; 干热岩潜力资源量折合标准煤 16.63×10^{12} t。盆地内部地热资源有利区主要分布于榆林—横山—靖边及子长—安塞—延安一带。目前鄂尔多斯盆地 0~200 m 浅层地热能开发主要以埋管地源热泵为主,地下水源热泵为辅。200~6000 m 中深层地热资源开发主要以深埋管换热方式和采灌结合方式开采。开发地热能,节能减排效果明显,值得大力推广。

关键词:水热型地热资源;浅层地热能;高温干热岩;有利区;开发方式;鄂尔多斯盆地
中图分类号:P962 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)04-0565-12

Liu R C, Ren Z L, Ye H Q, Ren W B, Wang K, Huai Y C, Qi K. Potential evaluation of geothermal resources: exemplifying some municipalities and key strata in Ordos Basin as a study case. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 565-576

Abstract: There exists debate in the geothermal field of Ordos Basin, including ambiguous understanding of geothermal resources reserves, nubilous development mode of shallow geothermal energy and difference in the delimitation of favorable horizon and prospects. Different evaluation methods were used to evaluate the potential and prospect of hydrothermal geothermal resources, shallow geothermal energy and dry hot rock geothermal resources in Ordos Basin. Combined with the development mode and benefit of geothermal resources, the geothermal resources in Ordos Basin was comprehensively analyzed. The analysis results show that Ordos Basin is relatively rich geothermal resources. The geothermal resources of hydrothermal type is equivalent to 24.94 billion tons of standard coal. The annual exploitable amount of geothermal resources is equivalent to 7.481 million tons of standard coal. The annual recoverable amount of shallow geothermal energy resources in 7 cities above prefecture level is equivalent to 2.812 million tons of standard coal, and the

收稿日期:2019-09-23;修订日期:2020-12-29

资助项目:国家重点研发计划《砂岩热储层采灌增效技术及装备》子课题《未固结砂岩热储层保护与增效钻完井技术及材料》(编号:2019YFB1504201)、国家自然科学基金重点项目《鄂尔多斯、沁水沉积盆地中生代晚期古地温场对岩石圈动力学演化及油气赋存的约束作用》(批准号:41630312)

作者简介:刘润川(1993-),男,硕士,从事地热及油气成藏方面的研究。E-mail:liurunchuan@mail.iggcas.ac.cn

* 通信作者:任战利(1961-),男,教授,从事盆地热演化史与油气成藏评价、地热资源评价及开发研究工作。E-mail:renzhanli@nwu.edu.cn

potential resources of dry hot rock are equivalent to 16.63 trillion tons of standard coal. The favorable areas of geothermal resource in the basin are mainly distributed in Yulin City -Hengshan County- Jingbian County and Zichang County Ansai County Yan'an City. At present, the development of 0~200 m shallow geothermal energy in Ordos Basin is mainly based on ground source heat pump, supplemented by ground water source heat pump. The development of 200~6000 m deep geothermal resource is mainly by the way of deep buried pipe heat exchange and the combination of mining and irrigation. Because of the obvious effect of geothermal energy development, energy conservation and emission reduction, it is worth promoting vigorously.

Key words: hydrothermal geothermal resources; shallow geothermal energy; high temperature dry hot rocks; favorable areas; development methods; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地为稳定的含油气盆地,构造简单,地热资源储量巨大,蕴藏丰富的中低温地下水,盆地深部存在稳定持久的地下热源,在采油井区分布众多钻孔,可较便捷地使用地下水。前人对鄂尔多斯盆地地热资源评价进行了深入的研究,但存在以下问题。首先对地热资源储量的认识差异较大,如王贵玲等^[1]认为鄂尔多斯盆地地热资源量为 1.48×10^{18} kJ,折合标准煤 503×10^8 t,可采资源量为 2.11×10^{17} kJ,折合标准煤 72×10^8 t^[1]。蔺文静等^[2]认为鄂尔多斯盆地部分层位储集热能 2.548×10^{18} kJ,折合标准煤 870.8×10^8 t。尹立河等^[3]认为鄂尔多斯主要热储层/有利层位储集热能 5350.7×10^{12} kJ,折合标准煤 182.7×10^8 t。其次,对鄂尔多斯盆地的地热储集层存在不同认识,如尹立河认为鄂尔多斯盆地的热储层主要有:下白垩系志丹群砂岩、石炭系—侏罗系碎屑岩、寒武系—奥陶系碳酸盐岩和周围断陷盆地的新生界松散层^[3]。霍改兰等^[4]认为鄂尔多斯盆地的热储层主要是白垩系洛河组砂岩中的含水岩系和奥陶系灰岩中的含水岩系。前人预测了鄂尔多斯盆地的地热资源量及地热富集区,且对盆地不同类型地热资源的开发方式进行了讨论。本次在前人工作的基础上针对盆地地热资源特点、资源富集区及不同类型的地热资源开发方式进行了系统总结。由于对鄂尔多斯盆地地热资源的不同认识,有必要对鄂尔多斯盆地地热资源的储量、富集层位、有利区、开发方式及利用现状等进行研究,以推动鄂尔多斯盆地地热资源的开发利用。

本文调研了目前国内外地热资源勘查开发技术的热点及发展趋势,查阅地热相关文献、实地调研现有的地热项目,搜集大地热流、地层测温、岩石生热率等资料,结合课题组砂体厚度、地温梯度等相关资料,确定盆地地热资源、储量及对应的有利区、有利层位和开发方式,研究成果对盆地地热开发有重要参考价值。

1 鄂尔多斯盆地地热资源分布规律

鄂尔多斯盆地是以中低温地热资源为主的稳定克拉通盆地^[5-6],地温随深度增加而增加,属于热传导型地热资源。鄂尔多斯盆地地热资源具有储集条件较好、储层较多、厚度较大、分布范围广的特点,总体上盆地地热资源开发潜力较大^[2]。近年来地热资源开发利用日益受到人们的重视,主要用于建筑物供暖(延安、榆林等)、温泉洗浴(佳县、铜川等)、大棚养殖(延安等地)等方面。通过对地温梯度异常区、大地热流异常区、关键层地热场和地表温度的研究,可以预测一定深度地热层的储层温度条件。地热能资源分布规律性较明显,总体上主要受莫霍面深浅的控制,同时也由断裂、构造、岩性等综合控制,分布不均匀。盆地南部地壳较薄,大地热流值较高;盆地北部构造稳定、地壳较厚,大地热流值较小。高温地热资源($\geq 150^\circ\text{C}$)主要分布在盆地周缘断陷内,鄂尔多斯盆地内部以中温地热资源($<150^\circ\text{C}$ 且大 $\geq 90^\circ\text{C}$)和低温地热资源($<90^\circ\text{C}$)为主,资源富集区分布于地温梯度较高、砂岩储层较好的地区^[7]。

水热型地热资源分布主要受热储层及地温梯度的控制。前人的观测资料表明,鄂尔多斯盆地地温梯度平均为 $2.93^\circ\text{C}/100\text{ m}$,代表中温型的地温场^[8],地温梯度总体上呈现出东高西低、南高北低的分布态势^[9]。其中,地温梯度最高的地区为庆阳—华池—永宁—安塞—一线,地温梯度为 $3.0^\circ\text{C}/100\text{ m}$,其次为杭锦旗—靖边—米脂—佳县地区,地温梯度较高,为 $2.9^\circ\text{C}/100\text{ m} \sim 3^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 。而地温梯度最低的地区是神木—乌审旗—鄂托克前旗以北地区到伊蒙隆起以南,地温梯度为 $2.7^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 。鄂尔多斯盆地岩石热导率整体随深度的增加而增加,盆地东部和南部热流值较高,西部和北部热流值较低,平均热流值为 $61.78\text{ mW}/\text{m}^2$ ^[8]。盆地北部地区

热流值较低,为 40~50 mW/m²。庆阳—延安地区大地热流值较高,为 70~80 mW/m²[9]。

浅层地热资源是地球表层岩土体中赋存的低温地热资源,位于地表以下一定深度范围内(通常为恒温带至 200 m 深处),温度低于 25℃,为在现有的技术条件下可开采的地热资源[10]。鄂尔多斯盆地浅层地热资源分布区主要分为风沙高原区、黄土高原区、渭北隆起区,依次对应温带大陆性气候、温带季风气候、亚热带气候,随着纬度降低,地表温度和恒温带温度逐渐升高且恒温带埋深逐渐减小,依次从 50 m 左右逐渐减小到约 25 m 左右。

干热岩资源目前有几种定义,根据国家能源局发布的国家能源行业地热标准 NB/T 10097—2018《地热术语》[11],把干热岩定义为:一种不含或者仅含少量流体、温度高于 180℃,其热能在当前技术条件下可以利用的岩体。火山活动区或地壳较薄的地区有利于干热岩的开发利用。鄂尔多斯盆地属于稳定的克拉通盆地,地壳平均生热率为 0.84,地壳平均热流为 24 mW/m²[10],属中等水平,盆地南部温度较高,达到干热岩标准埋藏深度较大。

2 鄂尔多斯盆地地热资源潜力评价方法

针对鄂尔多斯盆地地热资源储量认识不统一的问题,分别对盆地内部重点城市浅层地热能、盆地内部部分层位的中深层水热型地热能和深层干热岩地热能进行地热资源潜力评价,根据地热资源特点不同,采用不同的方法和参数进行计算。

2.1 重点城市浅层地温能评价方法

2.1.1 重点城市市区适宜性分区评价方法

城市浅层地温能计算需要在城市适宜性分区的基础上对区域 0~200 m 范围内的地质情况,利用层次分析法进行计算,层次分析法是将以往单纯利用经验及估计的办法量化,利用一系列权重计算数值进行评价的方法,具有定性和定量相结合、评价结果明确的优点。评价结果主要分为地下水地源热泵区、埋管地源热泵区、两者均适宜区和两者均不适宜区。根据地下水地源热泵的开发条件,将目标城市的地质背景条件、地下水动力场及水化学类型标定为地下水地源热泵的影响因素,具体指标包括:地下水硬度、地下水地质条件、地下水补给能力、地下水位埋深、含水层渗透系数、地下水同层回灌难易程度、有效含水层厚度等指标[12]。根据埋

管地源热泵的开发条件,将目标城市的地层结构及岩性、岩土体热物性、地温场分布三大类定位埋管地源热泵的主要影响因素,具体还包括研究区地层热导率、地层综合比热容、潜水位埋深、第四系地层厚度、地下水净流条件等因素分别计算[13]。通过综合指数法,将每个分区的属性赋值并加权,得出具体的分数,进行排除计算,结果表明,鄂尔多斯、榆林、延安、庆阳、平凉、固原等地市区内部埋管地源热泵系统适宜性强,地下水地源热泵适宜性差。铜川市市区属于埋管地源热泵和地下水地源热泵均适宜地区。

2.1.2 浅层地热资源量评价

(1) 浅层地热能热容量计算

浅层地热能资源容量包括浅层岩土体、地下水中储存的单位温差热量,同样采用热储层法计算,深度范围为 200 m 以浅,计算面积主要为城区人口主要居住面积。

$$Q_R = Q_S + Q_W + Q_A \quad (1)$$

式中, Q_R 为浅层地热能容量; Q_S 为浅层岩土体中的地热能容量; Q_W 为岩土体所含水的热能容量; Q_A 为岩土体孔隙中空气所含的热能容量,单位均为 kJ。

$$\text{其中, } Q_S = \rho_s C_s (1 - \varphi) M d \quad (2)$$

式中, ρ_s 为密度,单位为 kg/m³; C_s 为岩土体比热容,单位为 kJ/(kg·℃); φ 为孔隙度,单位为%; M 为面积,单位为 m²; d 为厚度,单位为 m。

$$Q_W = \rho_w C_w \varphi \omega M d \quad (3)$$

式中, ρ_w 为水密度,单位为 kg/m³; C_w 为水比热容,单位为 kJ/kg·℃; φ 为孔隙度,单位为%; ω 为含水饱和度,单位为%; M 为面积,单位为 m²; d 为厚度,单位为 m。

$$Q_A = \rho_A C_A (\varphi - \omega) M d \quad (4)$$

式中, ρ_A 为空气密度,单位为 kg/m³; C_A 为空气比热容,单位为 kJ/(kg·℃);

(2) 换热功率计算

根据开发方式不同,浅层地热资源的计算方法也不同,分别计算鄂尔多斯盆地风沙高原区、黄土高原区和渭北隆起区 3 个区域的浅层地热能容量与浅层地热能换热功率。埋管地源热泵在黄土高原区及风沙高原区较适宜,故按照埋管地源热泵换热功率计算总换热功率;渭北隆起区埋管地源热泵和地下水源热泵都适用,因此根据埋管地源

热泵换热功率的 2/3 和地下水地源热泵换热功率 1/3 的和来计算^[2],根据上述计算方法,可计算相应区域的冬季供暖面积和夏季制冷面积,完成浅层地热资源评价。

地下水地源热泵换热功率计算主要根据地下水资源水量及热量等参数进行折算,在考虑土地利用系数的情况下,根据单井浅层换热功率和可钻孔数量进行计算。

$$Q_q = Q_h \times n \times \tau \quad (5)$$

式中, Q_q 代表研究区的浅层地温能换热总功率,单位为 kW,其中 Q_h 代表研究区单井换热功率,单位为 kW, n 为计算面积内可钻孔数量。 τ 为所研究城市的土地利用系数(利用率)。基于上述参数可得到研究区的浅层地温能换热功率。

$$Q_h = q_w \Delta p_w C_w \times n \times \tau \times 1.16 \times 10^{-5} \quad (6)$$

式中, Q_h 代表单井换热功率; q_w 代表地下水循环利用量,单位为 m^3/d 。 Δt 为地下水利用温差,单位为 $^{\circ}C$ 。 ρ_w 为水的密度,单位为 kg/m^3 , C_w 为水的比热容,单位为 $kJ/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。

埋管地源热泵换热功率计算采用单位换热量法:

$$D = k_s \times L \times (t_1 - t_4) \quad (7)$$

式中, D 为埋管地源热泵换热功率,单位为 kW, k_s 为埋管换热器传热系数,单位为 $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。 L 为埋管换热器有效长度,单位为 m。 t_1 为埋管内流体的平均温度,单位为 $^{\circ}C$ 。 t_4 为温度影响半径之外的岩土体温度,单位为 $^{\circ}C$ 。

$$Q_h = D \times n \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中, Q_h 为浅层地热能埋管式换热功率,单位为 kW。 D 为单位面积浅层地热能换热功率,单位为 kW。 n 为计算面积内换热孔数。

2.2 中深层水热型地热资源评价方法

针对鄂尔多斯盆地地热有利区及有利层位不明确的问题,首先,根据资料对盆地内部中深层水热型地热资源深度范围为 200~3000 m 的富水砂岩或灰岩等岩性储层进行筛选确定,其次进行计算。热储层各个层位地层总热量计算公式为:

$$Q = (AH) C_v (T_p - T_c) \times 10^6 \quad (9)$$

式中, Q 为总热量,单位为 kcal; A 为热储面积,单位为 km^2 , H 为热储层平均厚度,单位为 m; C_v 为热储层体积比热容,单位为 $kcal/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$; T_p 为热储层平均温度,单位为 $^{\circ}C$; T_c 为基准温度(地下恒温

层温度),单位为 $^{\circ}C$ 。

水热型地热资源热水总热量采用容积法进行分层计算,计算公式如下:

$$Q = (AH\varphi S_w) C_v (T_p - T_c) \times 10^6 \quad (10)$$

式中, Q 为总热量,单位为 kcal; A 为热储面积,单位为 km^2 , H 为热储层平均厚度,单位为 m; φ 为孔隙度; S_w 为含水饱和度; C_v 为热储层体积比热容,单位为 $kcal/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$; T_p 为热储层平均温度,单位为 $^{\circ}C$; T_c 为基准温度(地下恒温层温度),单位为 $^{\circ}C$ 。

$$V_{水} = AH\varphi S_w \quad (11)$$

首先统计每一层位的砂厚比、分布面积和单层平均厚度,其中,各层位砂体分布面积根据课题组资料积累,使用 geomap 软件进行统计确定。单层砂体平均厚度、各层位砂厚比值及地层孔隙度数据采用课题组对盆地内部已有钻井数据进行统计得出的平均数据。三者相乘可以得到砂岩体积,再乘以对应的地层平均孔隙度可得出砂体内部的孔隙体积。根据课题组已有盆地内部地层含水饱和度资料,乘以对应的孔隙体积就可以得出相应地层水的总体积。其中,热储层位应选择温度大于 $25^{\circ}C$,展布范围较大、富水性较强层位所包含的范围。

对于地层温度而言,由岩石热导率、地层生热率、地温梯度等资料可以绘制不同层面的地温场分布图,根据分布图确定每一层位的具体温度。鄂尔多斯盆地的地表温度选择 $11.5^{\circ}C$ 。地层比热容由公式(12)计算得出,

$$C_v = \rho_w C_w \varphi + \rho_s C_s (1 - \varphi) \quad (12)$$

式中, C_v 是体积比热容($kcal/(m^3 \cdot ^{\circ}C)$), ρ_w 、 ρ_s 分别为水和岩石密度(kg/m^3); C_w 、 C_s 分别为水和岩石的质量比热容($kcal/(kg \cdot ^{\circ}C)$); φ 为孔隙度^①。

地热流体年可开采量由公式(13)计算得出,

$$V_{可采} = V_{水} \times 3/10^4 \quad (13)$$

式中, $V_{可采}$ 代表地热水年可采资源量,单位为 m^3/a 。 $V_{水}$ 为地热水资源总量,单位为 m^3 ,年可采资源量系数为 $3/10^4$ 。地热远景区的地热水年可采资源量计算采用可采系数法,开采系数的大小,取决于热储岩性、孔隙裂隙发育情况及补给情况,有补给情况下取大值,无补给情况下取小值。其中,Ⅰ:孔隙型层状热储层,系数 X 取值 3%~5% (100年),即 0.0003~0.0005 (每年);Ⅱ:岩溶型层状热储层,系数 X 取值 5% (100年),即 0.0005 (每年);Ⅲ:裂隙型层状热储层, X 取值 1%~2% (100年),即

0.0001~0.0002(每年)^[14]。

地热流体可开采热量可用下式计算:

$$Q_{\text{可采}} = Q \times C_w \times \rho_w \times (T_1 - T_0) \quad (14)$$

式中, $Q_{\text{可采}}$ 为地热流体可开采热量, 单位为 kJ/a ; C_w 为地热流体的比热, 单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_w 为地热流体的密度, 单位为 kg/m^3 ; T_1 为热储温度, 单位为 $^\circ\text{C}$; T_0 为恒温层温度 $^\circ\text{C}$ 。

考虑回灌条件下地热流体可采量由公式(15)计算得出。

$$V_{\text{灌采}} = V_{\text{水}} \times 85/10^4 \quad (15)$$

式中, $V_{\text{灌采}}$ 代表回灌条件下地热水年可采资源量, 单位为 m^3/a 。 $V_{\text{水}}$ 为地热水资源总量, 单位为 m^3 。 $85/10^4$ 为回灌条件下年可采资源量系数, 对于盆地型地热田, 按回灌条件下开采 100 年, 消耗 15% 的地热储量进行计算, 即每年消耗 0.000015 的热水储量^[12]。

考虑回灌条件下地热流体可开采热量见地热流体可开采热量计算公式, 将系数改变即可。

2.3 深层干热岩型地热资源评价方法

干热岩指不含或含少量水或蒸汽等流体, 温度在 180°C 以上且渗透率极低的岩体。限于目前的勘探开发技术, 采用体积法对鄂尔多斯盆地 3~10 km 处的不含水汽或含有少量水且温度高于 180°C 的干热岩地热资源储量进行计算。根据定义, 鄂尔多斯盆地在地下 6 km 温度达到 180°C , 因此将鄂尔多斯盆地干热岩地热资源埋深从 6 km 开始起算。体积法需要用到的参数有地表温度、目的层温度、大地热流值、岩石热导率等数据^[15]。基于鄂尔多斯盆地三维地质模型, 采用热储法进行干热岩的地热资源量概算^[16], 基本公式为:

$$Q_r = \rho C_p V (T_z - T_0) \quad (16)$$

式中, Q_r 代表干热岩地热资源总量, 单位为 J ; ρ 代表岩石的密度, 单位为 m^3 ; V 代表岩石体积, 单位为 m^3 ; T_z 代表计算深度的岩体温度, 单位为 $^\circ\text{C}$; C_p 为岩石比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

在本次干热岩地热资源量计算中, 鄂尔多斯盆地地温梯度采用 $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ ^[8]。恒温层温度采用 15°C 。根据地温梯度及恒温带温度计算: 热储层温度 3~4 km 采用 105°C ; 4~5 km 采用 135°C ; 5~6 km 采用 165°C ; 6~7 km 采用 195°C ; 7~8 km 采用 225°C ; 8~9 km 采用 255°C ; 9~10 km 采用 285°C 。

根据本次盆地模拟及现有的深部温度计算数

据, 在盆地 3 km 以上地温梯度采用 $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ 较合适^[17]。根据已有的鄂尔多斯盆地深部岩石样品密度测试数据, 统计其平均值作为本次计算所采用的平均密度值和平均比热容参数值, 其中, 在 3~6 km 深度岩石密度采用砂泥岩平均密度 $2299\text{ kg}/\text{m}^3$ 。在 6~10 km 深度采用花岗岩平均密度 $2700\text{ kg}/\text{m}^3$ 。整体盆地面积根据 GIS 软件识别, 选用 $25 \times 10^4\text{ km}^2$ 进行计算, 厚度数据根据课题组积累的已有数据进行选择。

3 鄂尔多斯盆地地热资源潜力

3.1 盆地内部重点城市浅层地热能资源潜力

上述方法的计算结果(表 1)表明: 盆地内部 200 m 以浅重点城市城区平凉市评价面积为 32 km^2 , 热容量为 $3.81 \times 10^{13}\text{ kJ}$, 固原市评价面积为 121.6 km^2 , 热容量为 $6.37 \times 10^{13}\text{ kJ}$, 庆阳市评价面积为 23.5 km^2 , 热容量为 $1.92 \times 10^{13}\text{ kJ}$, 鄂尔多斯市评价面积为 121.6 km^2 , 热容量为 $4.73 \times 10^{13}\text{ kJ}$ 。根据《陕西省大中型城市浅层地热能调查》项目^[18] 计算结果: 榆林市评价面积为 395.4 km^2 , 热容量为 $9.3 \times 10^{13}\text{ kJ}$, 延安评价面积为 86.31 km^2 , 热容量为 $3.89 \times 10^{13}\text{ kJ}$, 铜川市评价面积为 123.83 km^2 , 热容量为 $5.94 \times 10^{13}\text{ kJ}$, 鄂尔多斯盆地 7 个地级以上城市浅层地热能资源热容量为 $35.96 \times 10^{13}\text{ kJ}$, 折合标准煤 $0.1227 \times 10^8\text{ t}$ 。按照年可采 10% 计算, 7 个地级以上城市浅层地热能资源每年可采量折合标准煤 $122.7 \times 10^4\text{ t}$ 。

浅层岩土体、地下水中单位时间的热交换量就是浅层地热能换热功率^[14]。浅层地热能换热功率计算结果表明: 鄂尔多斯市区评价面积为 121.6 km^2 , 埋管地源热泵系统夏季制冷总功率为 $1.68 \times 10^6\text{ kW}$, 冬季制热总功率为 $0.49 \times 10^6\text{ kW}$ 。延安市区评价面积为 86.31 km^2 , 埋管地源热泵系统夏季制冷总功率为 $1.61 \times 10^6\text{ kW}$, 冬季制热总功率为 $0.79 \times 10^6\text{ kW}$ 。铜川市区评价面积为 123.83 km^2 , 埋管地源热泵系统夏季制冷总功率为 $1.83 \times 10^6\text{ kW}$, 冬季制热总功率为 $1.19 \times 10^6\text{ kW}$ 。榆林市区评价面积为 395.4 km^2 , 埋管地源热泵系统夏季制冷总功率为 $5.28 \times 10^6\text{ kW}$, 冬季制热总功率为 $1.96 \times 10^6\text{ kW}$ 。庆阳市区评价面积为 23.5 km^2 , 埋管地源热泵系统夏季制冷总功率为 $0.2 \times 10^6\text{ kW}$, 冬季制热总功率为 $0.43 \times 10^6\text{ kW}$ 。平凉市区评价面积为

32 km², 地理管地源热泵系统夏季制冷总功率为 0.6×10⁶ kW, 冬季制热总功率为 0.27×10⁶ kW。固原市区评价面积为 72.76 km², 地理管地源热泵系统夏季制冷总功率为 1.3×10⁶ kW, 冬季制热总功率为 0.65×10⁶ kW。

根据目前的技术现状, 浅层地热能主要用于建筑物供暖和制冷, 采用供暖和制冷面积表示各个地级市浅层地热能资源潜力。计算结果表明: 7 个地级以上城市可实现建筑物夏季制冷面积 12.3×10⁷ m², 冬季供暖面积 7.45×10⁷ m² (表 2)。

3.2 盆地内部水热型地热资源潜力

鄂尔多斯盆地水热型地热资源较丰富, 截止 2017 年初, 地热开采井 180 余处^①。根据公式(9)~(15)及水热型地热资源参数, 对盆地 200~6000 m 深处地热资源富集层位的资源量计算可得(表 3): 盆地内部富集层位地热储能总计约 17.456×10¹⁶ kcal, 折合标准煤 249.37×10⁸ t, 每年盆地中深层水热型地热资源可采量折合标准煤 748.102×10⁴ t, 高温地热资源(>150℃)分布极少, 以中温地热资源(90~150℃)和低温地热资源(<90℃)为主。其中, 水热型低温地热资源量折合标准煤 159.29×10⁸ t, 每年地热资源可采量折合标准煤 477.88×10⁴ t; 水热型中温地热资源量折合标准煤 90.1×10⁸ t, 每年地热资源可采量折合标准煤 270.23×10⁴ t。

针对盆地内部地热有利区及有利层位有分歧这一问题, 笔者认为鄂尔多斯盆地水热型低温地热资源纵向上主要分布在富县组、延安组、延长组, 埋深较浅, 中温地热资源主要分布在下石盒子组、直罗组 and 奥陶组, 埋深较大。区域上, 水热型低温地

热资源主要分布区为富县—延安—黄陵一带、华池—庆阳—合水等地区, 这些地区地温梯度高、地热资源储集条件好、砂岩厚度大、储层分布多、范围广, 地热资源开发潜力极大, 热储层的温度随着深度的增加增长速率较快, 地热资源储量大, 是鄂尔多斯盆地内部中低温地热资源开发的有利区域。

纵向上, 5 个目标地层总的储层热量折合标准煤 5431.69×10⁸ t (表 3), 可采储量按照 1% 计算折合标准煤 54.69×10⁸ t。鄂尔多斯盆地北部分布丰富的油区钻孔, 技术上可将废弃油井直接改造为地热井^[19], 可以采用深埋管换热开发方式或者采用水热型采灌结合技术, 此时考虑地层化石能源蕴藏丰富, 需要利用大型的油气与地热水分离净化设备, 对开采出来的地热水进行去油去气后才可用来取暖, 分离之后的油气可以利用, 而在回灌时水质中的各种离子含量需要达到一定的条件才可回灌注入地层^[20]。

3.3 盆地内部干热岩地热资源潜力

国际上对于干热岩的研究美、法、德、英、日起步较早, 已建立 25 个实验性质的 EGS 工程(15-欧洲、6-美国、2-澳大利亚、2-日本), 在目前的技术条件下, 完全大规模的 EGS 干热岩项目尚未产生。在中国, 2017 年 8 月, 青海共和盆地 3705 m 深处, 钻遇 236℃ 的高温干热岩体; 2018 年 3 月, 海南省北部地区 4387 m 处钻遇 185℃ 高温干热岩体, 中国的干热岩开发也逐步展开。

鄂尔多斯盆地属中低温盆地, 平均在地下 6 km 处地温可达到 180℃^[8, 21], 埋深较大, 技术进一步完善之后具备可采价值。盆地干热岩蕴藏潜力大, 在技

表 1 鄂尔多斯盆地地级市浅层地热能热容量、换热功率计算(考虑土地利用系数)

Table 1 Calculation of heat capacity and heat transfer rate of shallow geothermal resource in Ordos Basin

城市	评价面积/km ²	200 m 以浅热容量/10 ¹³ kJ	地下水源热泵换热功率/10 ⁶ kW		地理管地源热泵总换热功率/10 ⁶ kW		地源热泵系统换热功率/10 ⁶ kW		来源
			夏季制冷	冬季供暖	夏季制冷	冬季供暖	夏季制冷	冬季供暖	
鄂尔多斯市	121.60	4.73	0.00	0.00	1.68	0.49	1.68	0.49	本文
庆阳	23.50	1.92	0.00	0.00	0.43	0.20	0.43	0.20	本文
平凉市	32.00	3.81	0.00	0.00	0.60	0.27	0.60	0.27	本文
固原市	72.76	6.37	0.00	0.00	1.30	0.65	1.30	0.65	本文
榆林	395.40	9.30	0.00	0.00	5.28	1.96	5.28	1.96	[18]
延安	86.31	3.89	0.00	0.00	1.61	0.79	1.61	0.79	[18]
铜川	123.83	5.94	\	\	\	\	1.83	1.19	[18]

表4 鄂尔多斯盆地3~10 km深处干热岩资源
Table 4 Dry hot rock resources at the depth of 3~10 km in Ordos Basin

计算层位深度	干热岩资源量		干热岩可开采量 (按2%可提取)	
	资源量 /10 ¹⁹ kJ	折合标准煤 /10 ¹² t	资源量 /10 ¹⁸ kJ	折合标准煤 /10 ¹² t
6.0~7.0	9.79	3.34	2.90	0.067
7.0~8.0	11.38	3.88	3.37	0.078
8.0~9.0	12.99	4.43	3.84	0.089
9.0~10.0	14.58	4.98	4.32	0.01
3.0~10.0	48.74	16.63	14.43	0.333

源分布有利区进行了分析。鄂尔多斯盆地部分地热资源有利区主要分布在盆地东部区,东部区砂体厚度大、分布广、地温梯度高^③。

根据不同深度、不同层位温度分布及热储层分布规律,对不同层位地热资源有利区进行了预测。

延安组埋深在300~1600 m之间,平均深度800 m,地温分布在20~46℃之间,平均35℃,地热富集区集中在吴起—志丹—靖边地区。

延长组埋深在300~1300 m之间,平均深度800 m,地温分布在20~80℃之间,平均55.7℃,地热富集区主要分布于神木—榆林—靖边一带、米脂—子长—延安一带及延川—宜川—黄龙一带地区。

下石盒子组埋深在1500~4400 m之间,平均深度2800 m,地温分布在65~135℃之间,平均103.1℃,地热富集区在神木—榆林—横山一带,砂岩储层厚度大。石炭系—二叠系砂岩储层在神木—榆林—横山一带厚度大,最厚可达650 m,在南部区厚度较薄,为100~200 m。

奥陶系碳酸盐岩风化壳埋深在2800~4400 m之间,平均深度3500 m,地温分布在50~140℃之间,平均100℃,地热富集区主要分布于斜坡区的延安—靖边一带。

综合地温梯度、砂岩分布范围和大地热流分布规律,地热富集区分布于榆林—横山—靖边及子长—安塞—延安一带,其次为延川—宜川—黄龙地区及定边—吴起—志丹—安塞地区(图1)。

5 鄂尔多斯盆地地热资源开发利用

5.1 地热开发方式

5.1.1 浅层地热资源(200 m以浅)开发

针对盆地浅层地热能开发方式的问题,本文认

为鄂尔多斯盆地浅层地热资源开发主要有地下水地源热泵式和埋管地源热泵2种方式。鄂尔多斯盆地伊蒙隆起南部和陕北斜坡被第四纪松散堆积物所覆盖,形成黄土高原区,地下水资源不丰富,适宜采用埋管式地源热泵,铜川市以南等渭北隆起区埋管地源热泵和地下水地源热泵较适宜^②。

埋管地源热泵目前有垂直(图2-a)和水平2种方式埋管(图2-b),当可利用地表面积较大、浅层岩土体温度及热物性受天气、雨水、深度影响较小时,使用水平埋管较合适,如果埋深较浅,地温恢复较快,但埋深较深时,地温只能部分恢复。因此,对于多层深埋的水平管地下埋管热交换器需要和太阳能相结合,进行热补偿或者应用于冬夏两季冷热联供使用,水平埋管方式可在榆林、鄂尔多斯市等地进行施工,较适合住宅楼等建筑,应用较有限。垂直埋管方案应用较广,垂直埋管占地面积较小,换热能力较大,但是地温恢复较慢。地下埋管可分为U型管式和套管式,埋深很深的工程中可使用U型管,安装较简易、不易渗漏。对于套管式换热器而言,可以充分利用已有的钻孔资源,换热能力较高,但是结构复杂、有渗漏风险,鄂尔多斯盆地垂直埋管方案使用范围较广、效果较好^②。

地下水地源热泵主要利用开采井水与气温的温差释放的热量,然后将利用后的地下水通过回灌井回灌到地下。榆林市已建成使用地下水地源热泵2处,供热面积达到 8×10^4 m²。铜川市已建成地下水地源热泵1处,供热使用面积达到 7.1×10^4 m²。

埋管地源热泵是通过埋管换热器与岩土体进行热交换的地热能交换系统。它通过循环液(水)或以水为主要成分的防冻液在地下埋管中的封闭流动实现地热能交换系统与大地之间的热传导。其优点是系统不受地下水量的影响,对地下水没有破坏或污染作用,节能环保,系统运行具有高度的可靠性和稳定性。其主要缺点是埋地换热器的面积较大,成本较高等。截止2019年,延安市区内已建成埋管地源热泵一处,供热面积达 2.1×10^4 m²。榆林市区内已建成埋管地源热泵一处,供热面积达到 1.5×10^4 m²。

5.1.2 中深层地热资源(200~3000 m)开发

盆地中深层地热资源开发目前主要有2种方式,①是以中石化绿源公司为代表的水热型采灌结合的中深层地热能开采方式(图4),通过在底地面

打井至 2000 m 以下,形成地热井口集中分布,以井深多方位展布的方式,将地下热水抽提至地面后,通过板式换热器及梯级利用技术对热水进行利用,随后将地热尾水进行回灌。②是以陕西四季春公司为代表的中深层深埋管换热技术(图 5、图 6),在地面钻孔至 2000 m 以下,通过特制的密闭金属换热器,利用无污染的介质交换出地下热能,为地面提供永续、绿色的热源。采用“只取热,不取水”的方

式将中深层地热能用于建筑供暖的新技术,可就地开发,就地利用,形成分布式的热源开发利用体系。以延安市黄龙县为例,该县于 2019 年投资 1.05 亿元,在 24 个小区建成投用 24 对中深层水热型地热井。铜川市于 2019 年针对玉华宫景区、照金景区组织开展地热资源普查行动,为下一步地热井开发打好基础。鄂尔多斯市截止 2017 年已打成 16 眼水热型地热井。

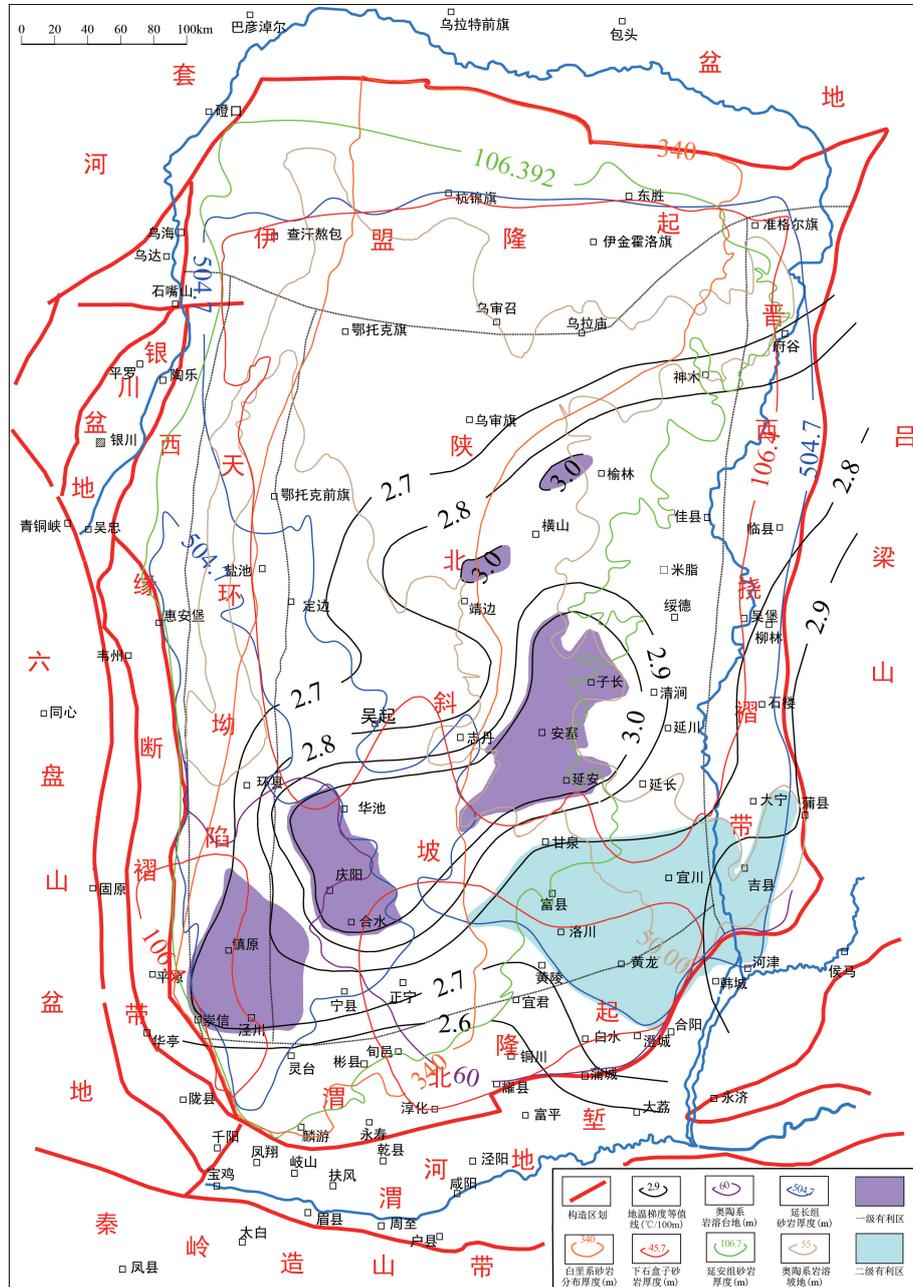


图 1 鄂尔多斯盆地有利区预测图

Fig. 1 Prediction of geothermal resource prospects in Ordos Basin

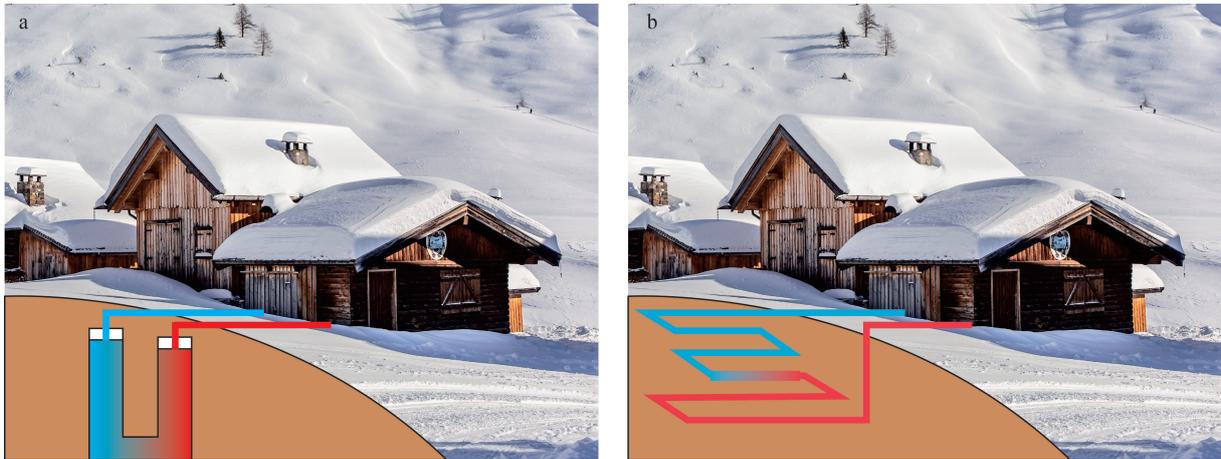


图2 垂直埋管闭式系统(a)和水平埋管闭式系统(b)

Fig. 2 Vertical buried pipe closed system(a) and horizontal buried pipe closed system(b)

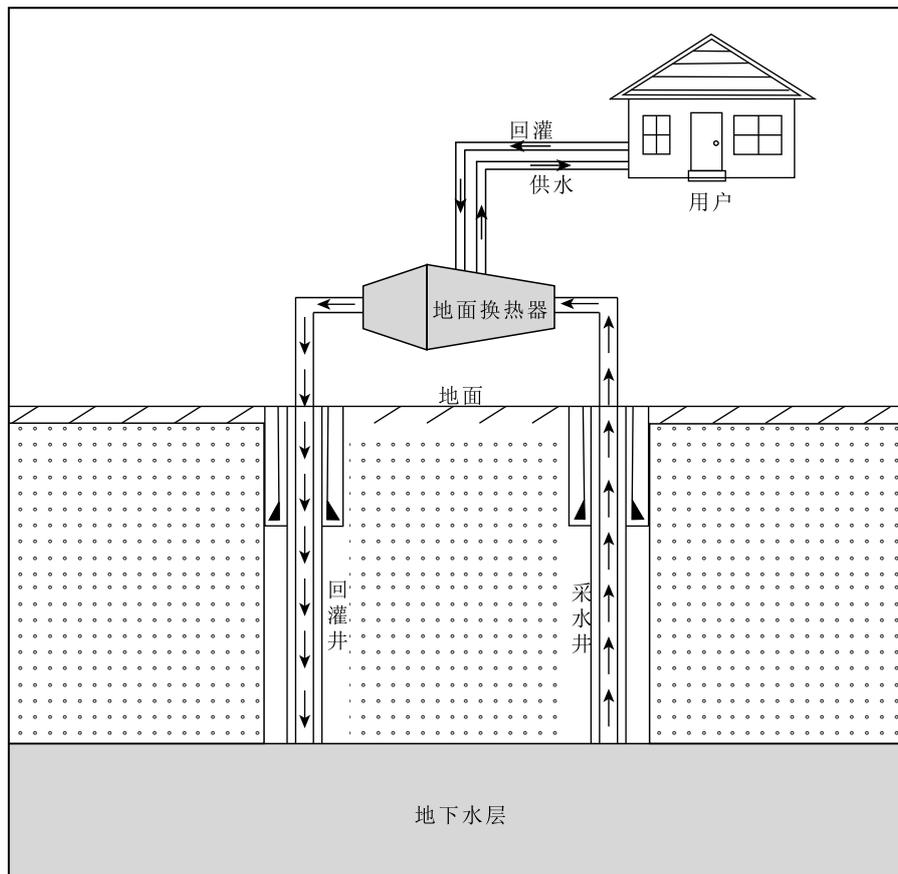


图3 采灌井结合供暖技术示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mining and irrigation well combined with heating technology

5.2 地热能利用

5.2.1 地热梯级利用

地热资源进行发电或直接利用主要取决于地热资源温度的高低。其中,用来发电的热水主要是 150°C 以上的热水,发电后降温的热水还可以进行梯

级重复使用^[24]。其中, $90\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的中温和 $25\sim 90^{\circ}\text{C}$ 的低温地热资源可以直接利用,多用于种植、养殖、供暖、制冷、旅游疗养等^[25]。目前,鄂尔多斯盆地的地热资源使用基本格局主要是盆地南部铜川、宝鸡等城市以洗浴、疗养、供暖为主。盆地中、北部城市

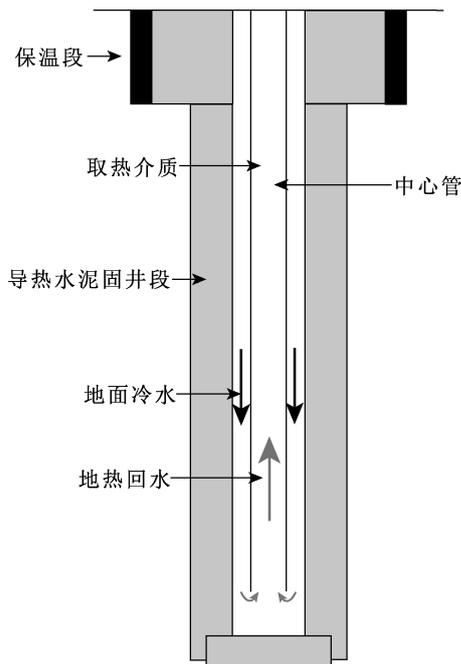


图 4 深埋管换热系统

Fig. 4 Deep buried pipe heat exchange system

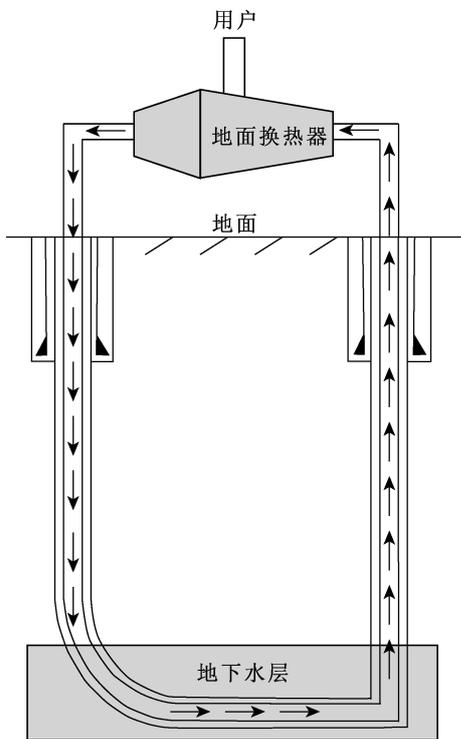
图 5 U 型水平对接管式取热系统^[23]

Fig. 5 U-type horizontal opposed nozzle heat extraction system

如延安、庆阳、榆林、鄂尔多斯等主要以供暖为主。在前期直接简单利用的基础上,后期可进一步向地热能梯级开发利用阶段迈进(图 6)。

5.2.2 地热直接利用

中国目前地热能直接利用量居世界第一,在现有技术条件下,浅层地热直接利用主要依靠地源热泵,浅层地热能地源热泵技术主要有埋管地源热泵、地下水源地热泵、地表水地源热泵 3 种^①。中深层地热能开发技术主要有深埋管换热方式和水热型采灌井结合方式 2 种,主要用来为建筑物供暖。

6 结 论

(1) 鄂尔多斯盆地是构造稳定的克拉通盆地,地热资源储集条件较好,储层发育、展布范围大、厚度大,地温梯度和热流值中等,地热资源分布广泛、资源种类较丰富,分布较均一。盆地内部发育中温地热资源(90~150℃)和低温地热资源(<90℃),全盆地以低温地热资源(<90℃)为主。根据地温梯度高值区和储层展布厚度区判断,地热资源有利区主要分布在榆林—横山—靖边及子长—安塞—延安一带,其次为延川—宜川—黄龙地区及定边—吴起—志丹—安塞地区。

(2) 鄂尔多斯盆地地热资源较丰富。水热型地热资源量折合标准煤 249.367×10^8 t,年可采储量折合标准煤 748.102×10^4 t。7 个地级以上城市浅层地热能资源储量折合标准煤 1227×10^4 t,按照年可采 10% 计算,浅层地热资源年可采量折合标准煤 122.7×10^4 t。干热岩远景资源量折合标准煤 16.63×10^{12} t,在现有的技术条件下开采较为困难,但是前景广阔,潜力大。

(3) 目前鄂尔多斯盆地浅层地热资源直接利用主要依靠埋管地源热泵系统,占地面积小、换热效率高,地下水源地热泵系统在盆地内适用范围较小。盆地内中深层地热能利用主要依靠深埋管换热开发技术和水热型采灌井结合地热开发技术。其中深埋管换热开发技术具有无需回灌、分布式供暖、取热不取水等优点;水热型采灌井结合地热开发技术具有单井供热面积大、效率高,可接入城市管网统一供暖等优点。

(4) 地热资源具有稳定、清洁、储量大等优点,大力推广后节能效果明显。

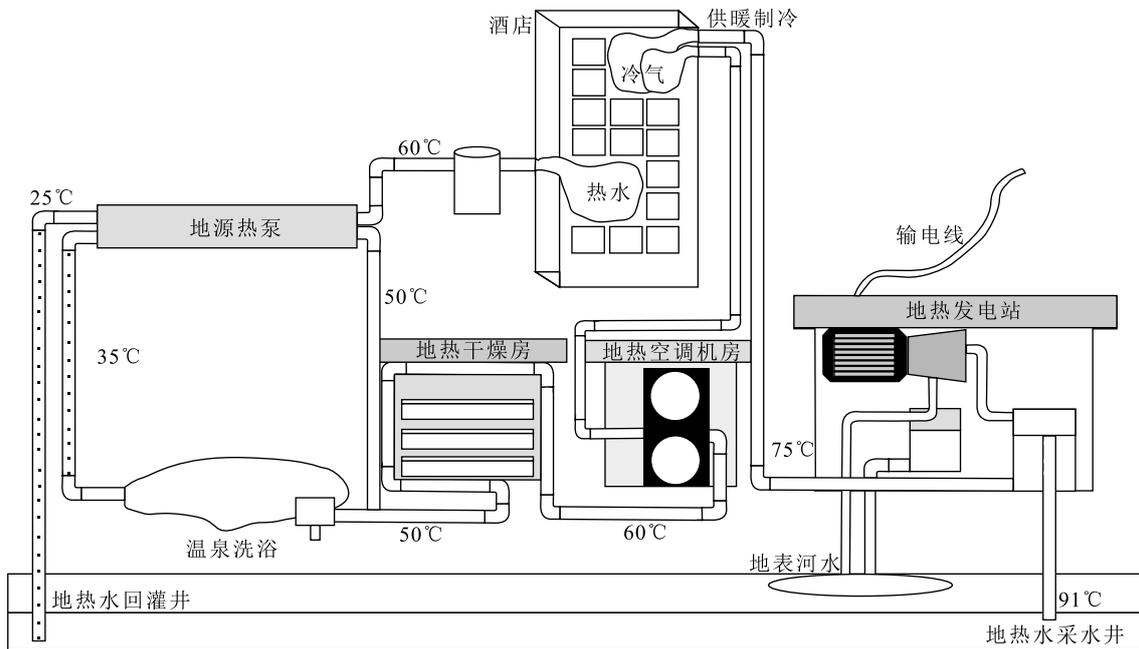


图6 采灌结合地热梯级开发利用模式图(据参考文献[25]修改)

Fig. 6 Schematic diagram of geothermal cascading development combined with mining and irrigation

参考文献

- [1] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-450,134,451-459.
- [2] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等.中国地热资源及其潜力评估[J].中国地质,2013,40(1):312-321.
- [3] 尹立河,侯光才,张茂省,等.鄂尔多斯盆地地热系统[J].工程勘察,2008,(2):34-38.
- [4] 霍改兰,屈永清,马少华,等.鄂尔多斯盆地地热资源形成条件研究[J].西部资源,2011,(5):67-69.
- [5] 孔维臻.地热资源开发利用经济评价研究[D].中国地质大学博士学位论文,2013.
- [6] 杨献忠,李麟,康丛轩,等.鄂尔多斯古陆金刚石成矿条件及找矿潜力[J].地质通报,2019,38(1):22-26.
- [7] 任战利,于强,崔军平,等.鄂尔多斯盆地地热演化史及其对油气的控制作用[J].地学前缘,2017,24(3):137-148.
- [8] 任战利,张盛,高胜利,等.鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J].中国科学(D辑),2007,(S1):23-32.
- [9] 祁凯.鄂尔多斯盆地中—新生代热体制及岩石圈动力演化初探[D].西北大学硕士学位论文,2018.
- [10] 刘绍文,王良书,贾承造,等.中国中西部盆地岩石圈热—流变学结构及其对前陆盆地成因演化的意义[J].地学前缘,2008,(3):113-122.
- [11] 庞忠和,李义曼,赵丰年,等.地热能术语(NB/T10097-2018)[S].北京:中国石化出版社,2019.
- [12] 周阳,邓念东,王凤,等.浅层地热能适宜性分区结构的分形原理[J].中国地质调查,2017,4(1):18-23.
- [13] 王楠.长春市城区浅层地热能评价及地下水热泵采灌模式研究[D].吉林大学博士学位论文,2016.
- [14] 张薇,王贵玲,刘峰,等.中国沉积盆地型地热资源特征[J].中国地质,2019,46(2):255-268.
- [15] 蔺文静,刘志明,马峰,等.我国陆区干热岩资源潜力估算[J].地球学报,2012,33(5):807-811.
- [16] 汪集扬,胡圣标,庞忠和,等.中国大陆干热岩地热资源潜力评估[C]//中国科学院地质与地球物理研究所2012年度(第12届)学术年会,2013.
- [17] 任战利,刘丽,崔军平,等.盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用[J].石油与天然气地质,2008,29(4):502-506.
- [18] 周阳,穆根胥,刘建强,等.典型地貌单元浅层地热能资源量赋存规律[J].地质科技情报,2018,37(4):232-238,268.
- [19] 董秋生,黄贤龙,郎振海,等.废弃油井改造为地热井技术分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(6):18-21.
- [20] 甄华,莫中浩.报废油井改造成地热井的方法[J].煤气与热力,2007,27(1):47-50.
- [21] 刘峰,王贵玲,张薇,等.江西宁都县北部大地热流特征及地热资源成因机制[J].地质通报,2020,39(12):1883-1890.
- [22] Majer E L, Baria R, Stark M, et al. Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems[J]. Geothermics, 2007, 36(3): 185-222.
- [23] 任文波.渭河盆地中深层地热资源特征及开发利用[D].西北大学硕士学位论文,2019.
- [24] 王贵玲,张发旺,刘志明.国内外地热能开发利用现状及前景分析[J].地球学报,2000,21(2):134-139.
- [25] 马伟斌,龚宇烈,赵黛青,等.我国地热能开发利用现状与发展[J].中国科学院院刊,2016,31(2):199-207.
- ①任战利,任文波,刘润川,等.鄂尔多斯盆地地热资源调查分布评价成果报告.中国地质调查局西安地质调查中心合作项目,2018.
- ②任战利,任文波,刘润川,等.陕西地热资源调查分布评价报告.陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院合作项目,2017.
- ③西安西大科技工程研究院.陕西省地热资源开发利用评价.陕西西安:陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,2017.