

基于参数辨识的典型区地热资源量研究

——以银川平原西部斜坡区为例

何雨江¹⁾, 丁祥²⁾

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄, 050061; 2) 河南理工大学, 资源环境学院, 河南焦作, 454159

内容提要:通过地温监测、含水层结构和岩性构造辨识,剖析了银川平原西部斜坡区地热田的地温场特征和热储层分布规律,确定了热储随机变量,并分别利用随机变量频率分布和三角分布等蒙特卡罗统计手段识别了随机变量参数,结合热储法计算了典型区地热资源量。研究表明:银川平原地热田属深循环中低温传导型地热系统,共分为5个构造分区(西部斜坡区、中部深陷区、东部斜坡凹陷区、东部斜坡隆起区和南部斜坡区)和4个热储层(新近系干沟河组、新近系红柳沟组、古近系清水营组 and 奥陶系马家沟组)。研究区地热资源储量丰富,垂直地温场温度与地层深度呈正相关关系,主要热储层位于400~800m的渐新统清水营组;研究区热储随机变量包括热储温度、岩石孔隙率、岩石比热容和岩石密度等参数,热储温度随机分布频率为25%、50%、75%、97.5%的西部斜坡区地热资源量在 $175.56 \times 10^{14} \sim 230.04 \times 10^{14}$ kJ之间,其中,75%的热储温度随机分布频率可作为研究区热储温度随机变量的优选频率,该频率下地热资源储量与热储法分层计算结果标准差仅为4.21%;利用热储特征分析和蒙特卡罗法的参数识别,能够克服热储层参数的强烈空间变异,为快速精准评价区域地热资源量和科学开发利用地热资源提供新途径。

关键词:地热资源量;参数识别;随机变量频率;三角分布;热储特征

地热能是一种高效稳定的绿色能源(Hemant et al., 2016; Zhou Zongying et al., 2015; Hou Jianchao et al., 2018; Chiara et al., 2018; Tine et al., 2019; Nicolas et al., 2019),其特点是清洁低碳,在我国分布广泛且资源储量丰富(Yin Yulong, 2018; Yan Baizhong et al., 2019; Abdul-Ghani et al., 2020)。地热资源应用广泛,如发电、干燥、医疗、洗浴、养殖和灌溉等(Zhang Jinhua et al., 2011; Li Jun, 2016; Lu Jingdan et al., 2019; Li Ningbo et al., 2020)。而科学开发利用地热资源的前提是对区域地热资源进行精准评价(Wang Guiling et al., 2017)。

目前,国内外评价地热资源量的方法很多,包括热储法(体积法)(Wang Zhixiang et al., 2015; Zhu Xi et al., 2016; Ren Guangyuan, 2019)、自然放热量推算法、水热均衡法、类比法和数值模拟法(Pathak

et al., 2014; Detournay et al., 2015; Sutopo et al., 2019; Heru et al., 2020; Tang Shengli et al., 2020)等,这些方法均考虑了影响热储层的众多因素,特别是热储法的应用非常广泛。热储法不但适用于非火山型地热资源量的计算,而且适用于与近期火山活动有关的地热资源量计算,不仅适用孔隙型热储,而且也适用于裂隙型热储。Nathenson et al. (1975)采用统计学方法(Li Guoji et al., 2017)计算地热资源,首先计算包含于一个给定体积的岩石和水中的热量,然后再计算资源回收率,达到评价资源可开采量,该法是一种以开采量与水位监测实测数据为基础的评价方法,缺点是对地区资料完备性要求高,适合勘探程度较高的地区。Lin Wenjing et al. (2013)和 Ren Guodeng (2015)对不同类型地热资源量计算进行了分析,如浅层地热能采用热储法或者数值法进行评价,对水热型地热资源和干热岩采用热储法

注:本文为中国地质调查项目(编号 DD20190555)资助成果。

收稿日期:2020-05-11;改回日期:2020-06-04;网络发表日期:2020-06-09;责任编辑:邱楠生;责任编辑:周健。

作者简介:何雨江,男,1981年生。副研究员,主要从事地热能资源评价与战略研究工作。Email: heyujiang86@163.com。

引用本文:何雨江,丁祥. 2020. 基于参数辨识的典型区地热资源量研究:以银川平原西部斜坡区为例. 地质学报, 94(7): 2131~2138, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020231.

He Yujiang, Ding Xiang. 2020. Calculation of geothermal resources based on parameter identification——a case study from the western slope of the Yinchuan plain. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2131~2138.

计算,为地热资源评价提供了科学依据。

但是,由于热能资源评估本身就是一个随机问题,采用上述方法评估地热资源时,参数的精确性难以控制,影响因素包括:仪器设备的精度,测定过程中人为技术上的差异,以及区域参数的空间差异(Noah et al.,2019)等等。而蒙特卡罗法(Manan et al.,2018)是一种考虑变量随机特征的数学方法(Anthony et al.,2020),在控制参数变量方面优势明显,可以精准描述和模拟这一随机过程。因此,本文拟联合蒙特卡罗法和热储法,以银川平原西部斜坡区为典型区进行地热资源评价。

1 研究区概况

1.1 气候条件

银川平原地处内陆地区,属于中温带内陆干旱气候区,具有典型的大陆性气候特征,夏季受到东南季风暖湿气流的影响,冬季则处于蒙古高压形成的西风激流控制之中,昼夜温差大、降水量少,蒸发作用强烈(Zhang Zhi et al.,2008)。银川平原年内平均气温为 8~9℃,1 月份平均最低温度零下 22℃,极端低温时甚至达到零下 30.6℃,7 月份平均温度为 17~24℃,夏季最高温度达到 39.3℃。研究区内夏季多雨,但降水量不大,多集中在 6~9 月,多年平均降水量约为 183.59mm。

1.2 地质概况

银川平原位于河套平原西南部,属于内陆构造平原,是断裂下陷后,由黄河冲积而成,南北长约 280km,东西宽 10~50km。宁夏地层发育良好,其中前新生界分布面积约占 19%,主要出露于贺兰山、卫宁北山、牛首山、罗山、青龙山、香山、南华山、西华山及六盘山等基岩山地区,灵(武)盐(池)台地及南部黄土区沟谷中亦有零星分布;新生界出露面积约占 81%,广泛分布于基岩山地外围丘陵及河谷盆地。宁夏大地构造位于柴达木-华北板块中南部,东面是稳定的华北陆块,西北侧为阿拉善微陆块,西南为祁连早古生代造山带。地层发育齐全,新构造活动活跃,大地构造复杂,断裂发育。地热田按照从西到东、从北到南,可划分为西部斜坡区、中部深陷区、东部斜坡凹陷区、东部斜坡隆起区及南部斜坡区等五个构造分区。

1.3 水文地质特征

银川平原地下水类型主要为松散岩类型孔隙水,研究区所处位置的水文地质条件明显受岩性控制。贺兰山东麓洪积倾斜平原以东,岩性由单一砂

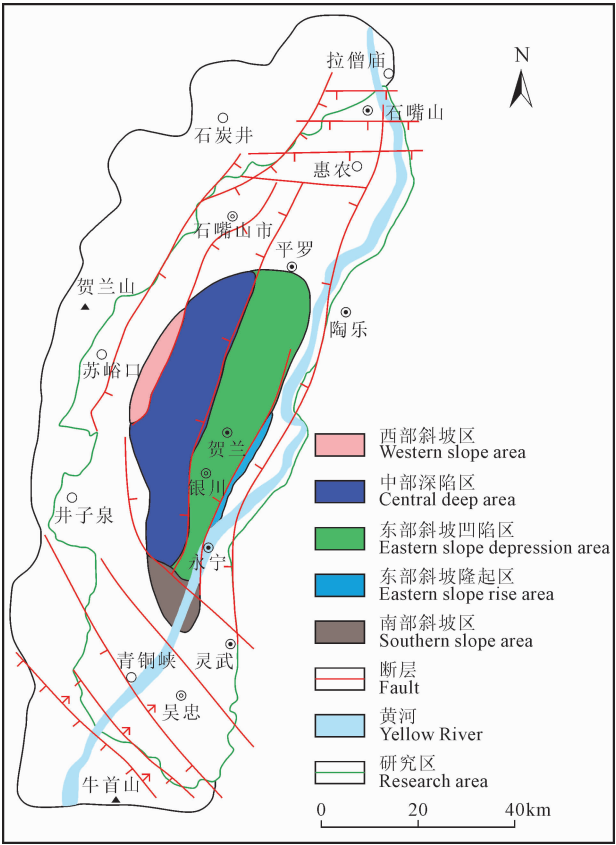


图 1 银川平原地热资源构造分区
Fig. 1 Structural division of geothermal resources in Yinchuan plain

砾卵石结构递变为砂性土与黏性土互层的多层结构,从而导致地下水由单一潜水渐变为潜水-承压水的“多层结构”,265m 埋深以内有潜水、第一承压水、第二承压水。银川平原年大气降水稀少,地下水资源匮乏,每年从黄河干流入境水量略大于实测出境水量,降水时空分布不均匀。

2 地热资源特征

2.1 地温场特征

银川平原目前有三口地热井(Y1、Y3、NSR-1)深度较大,通过井温监测发现:在 3000m 左右地温可达到 80℃以上(图 2),100 m 以内地温波动比较大,地温场温度与地层深度呈正相关关系。银川平原地温梯度可由 Y1、Y2、NSR-1 三口地热井的温度梯度推测而得。地热井分段地温梯度(表 1)显示:银川平原深部地温梯度变化较为平稳。

2.2 热储层特征

银川平原主要的热储层为上新统、中新统、渐新统和奥陶系上新统。干河沟组热储层厚度约为 100~300m,该组地层岩性为灰白、浅黄色中细粒砂砾

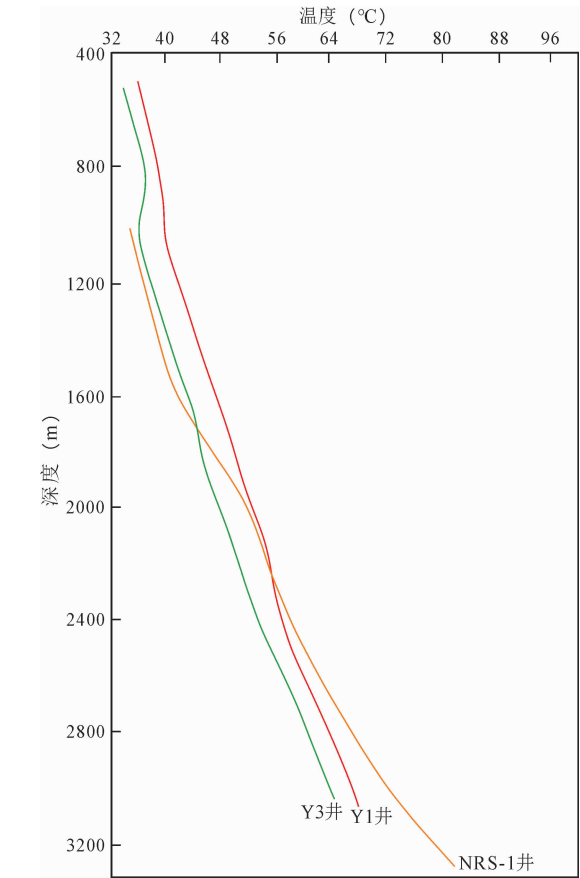


图 2 银川平原地热测井温度与深度关系曲线
Fig. 2 Relation between temperature and depth of geothermal well in Yinchuan plain

岩、粗砂岩夹棕黄、浅棕色泥岩、砂质泥岩,含较为丰富的碳化植物化石。

表 1 银川平原 Y1、Y3、NSR-1 地热井分段地温梯度 (°C/100m)

Table 1 Sectional geothermal gradient of Y1, Y3, NSR-1 geothermal wells in Yinchuan plain (°C/100m)			
时代	Y1 井	Y3 井	NSR-1 井
Q	1.86	1.60	1.47
N ₂	1.91	1.74	2.13
N ₁ ³	2.10	2.50	1.89
N ₁ ²	2.50	2.04	1.89
N ₁ ¹	2.61	1.70	1.89
E	-	-	3.49
平均值	2.19	1.92	2.25

中新统红柳沟组热储层厚度为 300~500m。该组地层岩性为上部浅灰、浅棕色细粒砂岩夹浅棕、深棕色砂质泥岩,砂岩局部含砾石,下部浅灰、灰色泥岩、粉砂质泥岩夹中细砂岩,向下泥岩变为灰绿至黄绿色,砂岩中可见砾石。

渐新统清水营组热储层地层厚度约为 400~

800m。该组地层岩性为棕红、酱红色泥岩、砂质泥岩,灰白、灰绿、棕红等杂色砂砾岩、砂岩、粉砂岩互层,砂岩钙质胶结,局部夹少量泥灰岩。

下方奥陶系马家沟组热储层上部为风化壳,残余成分主要为硅质泥岩,含少量燧石,下部为硅质白云岩。该热储层裂隙含水,属于地下水深部循环系统,富水性一般,水质较差。

2.3 区域构造特征

银川平原大地构造位于柴达木-华北板块中南部,涉及 3 个二级构造单元:东面是稳定的华北陆块,西北侧为阿拉善微陆块,西南为祁连早古生代造山带。其中包括 3 个三级构造单元(鄂尔多斯地块、腾格里早古生代增生楔和北祁连中元古代—早古生代弧盆系),5 个四级构造单元(鄂尔多斯西缘中元古代—早古生代裂陷、鄂尔多斯中生代拗陷、卫宁北山—香山晚古生代前陆—上叠盆地、景泰—海原中元古代—早古生代弧后盆地和白银—西吉中元古代—早古生代岛弧),12 个五级(V)构造单元,包括褶断带、冲断带、大型断(拗)陷盆地、大型向斜构造等。

2.4 地热流体特征

银川平原热储由盖层、储层、热源和热水来源组成。盖层主要由第四系松散沉积物构成,厚度为 500~1200m,沉积物为砾石、砂砾石、含砾砂、粗砂—细砂夹黏土,结构疏松,胶结程度差,密度小,导热性差,热阻大,是天然的热储盖层。热储层主要包括:上新统热储层段,中新统热储层段,渐新统热储层段的砾状砂岩-粉砂质泥岩岩层,以及奥陶系中统热储层段的结晶灰岩、硅质白云岩岩层,各热储层之间由泥岩相隔。热源主要是来自深部地幔和地壳的热量,以及断裂生热和放射性衰变产热,在正常地温梯度下传导加热热水储集层。地热水主要受贺兰山区的大气降水经断裂带和露头区补给,并在地质历史过程中不断地向深部运移,在此过程中不断被岩层加热并储集在热储层中。

3 地热资源量计算

在前文摸清银川平原断裂构造和热储层的基础上,以西部斜坡区作为典型区进行地热资源量计算。

3.1 参数分类

通常采用热储法(体积法)计算地热资源总量,表达式为:

$$Q_R = Ad[\rho_c C_c (1 - \varphi) + \rho_w C_w \varphi](t_r - t_0) \quad (1)$$

式中: Q_R 为地热资源总量(kJ); A 为热储面积(m^2); d 为热储层厚度(m); ρ_c 为热储岩石的密度(kg/m^3); C_c 为热储岩石的比热容($kcal/kg \cdot ^\circ C$); φ 为热储岩石孔隙率(或裂隙率)(%); ρ_w 为水的密度(kg/m^3); C_w 为水的比热容($kcal/kg \cdot ^\circ C$); t_r 为热储温度($^\circ C$); t_0 为基准温度(即当地地下恒温层温度或年平均气温)($^\circ C$)。其中,热储温度参数采用地温梯度推算法。地温梯度推算表达式:

$$T_r=(Z-Z_0)G_i+T_0 \tag{2}$$

式中: Z 为热储埋藏深度(m); Z_0 为恒温层埋藏深度(m); G_i 为地温梯度($^\circ C/100m$)。

根据典型区的地热资源分布特征,对(1)式中所有参数进行分类讨论。

(1)恒定参数:本研究的热储面积恒定值为 $114.18 \times 106m^2$ 。地温梯度由地核热变和地层介质热导率控制。中国沉积盆地平均地温梯度在 $1.5 \sim 4.0^\circ C/m$,根据表1对Y1、Y2、NSR-1三口地热测井地温梯度取算数平均值 $2.19^\circ C/100m$ 、 $1.92^\circ C/100m$ 和 $2.25^\circ C/100m$ 。恒温层温度为定值,取 $13.5^\circ C$ 。地下水密度值为 $1000kg/m^3$,比热容为 $4.18\text{ kJ/kg} \cdot ^\circ C$,热储厚度为定值 $1578.77m$ 。

(2)随机参数:岩石孔隙率可以通过室内试验、测井、抽水试验及比拟法求得。岩石密度可以根据取样实验得出,由于分区区域地质条件的差异导致所测得密度值有所差异,因此将岩石密度参数作为随机变量。热储厚度一般可以通过钻探和综合分析测得,是随机变量,根据(2)式,热储温度也同样是随机变量。因此,根据水文地质条件、地球物理、地球化学、地热井测量数据表明,热储温度、岩石孔隙率、岩石比热容和岩石密度是随机变量(Iglesias et al., 2003),同时现场人为测定的误差也是变量随机的重要影响因素。

3.2 识别随机变量参数

本次研究考虑4个不确定参数,分别是:热储温度、岩石孔隙率、岩石比热容和岩石密度。其中,热储温度作为独立随机变量,通过频率分析法确定,其余三个变量符合三角分布(Iglesias et al., 2003)。

由于热储温度、热储厚度等参数为独立的随机变量,则针对任意的随机变量热储温度,根据大小对实测值进行排序,从而利用公式(3)求得大于等于某一实测值的频率分布P。

$$P = \frac{m}{n+1} \tag{3}$$

式中: m 为大于等于某一实测值的数据总个数; n 为

实测样本数据总数。

由于蒙特卡罗法求得的资源量样本符合正态分布,则随机分布频率曲线必定存在拐点,以频率为拐点时的对应值为期望值,从统计学的观点来看,这一拐点出现的次数越多,则结果越可靠。根据Y1、Y2、NSR-1三口地热井所测温度绘制随机分布曲线图,图3a~d分别为 $0 \sim 1000m$ 、 $1000 \sim 2000m$ 、 $2000 \sim 3000m$ 、 $3000 \sim 4000m$ 深度时热储温度的变化。

根据图3,利用拟合方程求得拐点分别在0.25、0.5、0.75、0.975时的热储温度(表2),结合公式(1)求得地热资源量。

表2 银川平原不同深度的随机分布热储温度($^\circ C$)
Table 2 The heat storage temperature ($^\circ C$) with random frequency at different depths in Yinchuan plain

随机分布 频率(%)	深度(m)			
	0~1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000
25	34.204	56.499	70.332	88.371
50	31.100	52.999	66.561	82.871
75	27.996	49.500	62.789	77.371
97.5	25.203	46.350	59.394	72.420

通过估算三角形概率分布的最大、最小及最可能值来确定变量参数。根据所测得地热井参数资料,以及研究区岩土热物性实验数据可知,银川平原西部斜坡区地热田的热储岩石的比热容最大值为 $0.932\text{ kJ/kg} \cdot ^\circ C$,最小值为 $0.882\text{ kJ/kg} \cdot ^\circ C$,最可能值为样本平均值 $0.92\text{ kJ/kg} \cdot ^\circ C$ 。通过对区域地热井所测数据分析,岩石密度也可以作为一组随机变量分析最大值为 2660 kg/m^3 ,最小值为 1750 kg/m^3 ,最可能值为样本平均值 2420 kg/m^3 。岩石孔隙率也作为符合三角分布的变量,最大值为0.308,最小值为0.0568,最可能值为0.22645。由此利用蒙特卡罗法三角分布所获得的变量参数及恒定参数综合列于表3,根据公式(1)和采用蒙特卡罗法计算得到的参数(表3)评价银川平原西部斜坡区内不同深度地热资源量(表4)。

表3 蒙特卡罗法热储参数一览表
Table 3 Monte Carlo method heat storage parameters list

参数名称	最大值	最可能	最小值	分布类型
岩石孔隙率(%)	0.308	0.226	0.057	三角分布
岩石比热容($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ C$)	0.932	0.917	0.882	三角分布
岩石密度(kg/m^3)	2660	2420	1750	三角分布
热储面积(10^6m^2)		114.180		恒定值
恒温层温度($^\circ C$)		13.500		恒定值
地下水密度(kg/m^3)		1000.000		恒定值
地下水比热容($\text{kJ/kg} \cdot ^\circ C$)		4.180		恒定值

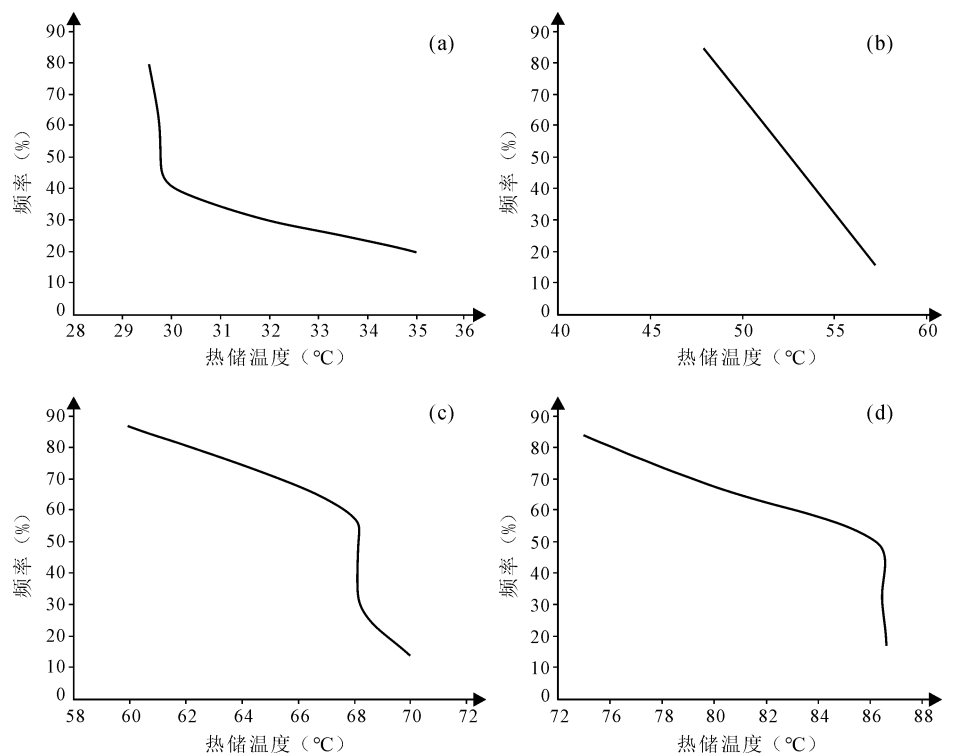


图 3 银川平原热储温度随机分布曲线

Fig. 3 Random frequency of the thermal storage temperature in Yinchuan plain

(a)—0~1000m 深度;(b)—1000~2000m 深度;(c)—2000~3000m 深度;(d)—3000~4000m 深度
(a)—Depth 0~1000 m;(b)—depth 1000~2000 m;(c)—depth 2000~3000 m;(d)—depth 3000~4000 m

表 4 银川平原西部斜坡区不同深度
的热储资源量(×10¹⁴kJ)

热储温度随机 分布频率(%)	深度(m)				合计
	0~1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000	
25	24.86	71.18	81.23	52.77	230.04
50	21.17	65.39	75.84	48.89	211.29
75	17.41	59.6	70.45	45.01	192.47
97.5	14.06	54.38	65.6	41.52	175.56

根据热储法和表 5 计算银川平原西部斜坡区:干河沟组地热资源量为 25.82×10¹⁴ kJ,红柳沟组地热资源量为 54.63×10¹⁴ kJ,清水营组地热资源量为 75.04×10¹⁴ kJ,马家沟组地热资源量为 45.46×10¹⁴ kJ,统计银川平原西部斜坡区地热资源总量为 200.95×10¹⁴ kJ。根据热储温度在不同随机分布频率下的线性关系(图 3),对比 4 种频率计算结果发现:保证率为 75%的地热资源量为 211.29×10¹⁴ kJ 与热储法计算的地热资源量差值最小,仅为 8.48×

表 5 热储法参数汇总表

Table 5 Parameters of thermal storage method							
地层	温度分级(℃)	热储厚度(m)	热储温度(℃)	水比热容(kJ/kg·℃)	热储面积(×10 ⁶ m ²)	水密度(kg/m ³)	恒温层温度(℃)
干河沟组	25~40	446.05	35.0	4.473	114.18	991.08	13.5
红柳沟组	40~60	472.41	46.5	4.514	114.18	987.55	13.5
清水营组	60~90	416.18	66.0	4.598	114.18	983.18	13.5
马家沟组	60~90	244.13	78.0	4.18	114.18	1000	13.5

10¹⁴ kJ,标准差约为 4.21%,因此,选取 75%的热储温度频率作为研究区热储温度变量的优选频率。

4 结论

(1)银川平原地热田属深循环中低温传导型地

热系统,属层状裂隙型热储。地热水主要靠贺兰山地区大气降水入渗补给,地热水在下渗运移过程中被加热,地热资源量基本为静储量,深部地热水更新能力差。地热田从西到东、从北到南划分为西部斜坡区、中部深陷区、东部斜坡凹陷区、东部斜坡隆起

区及南部斜坡区等五个构造分区;从上到下划分为新近系干沟河组、新近系红柳沟组、古近系清水营组、奥陶系马家沟组四个热储层。计算结果显示:银川平原地热资源储量丰富,主要热储层位于 400~800m 的渐新统清水营组。

(2)热储温度、岩石孔隙率、岩石比热容和岩石密度等参数是资源量计算中的随机变量。通过频率分析和三角分布法对随机变量进行识别,计算得到西部斜坡区热储温度在 25%、50%、75%、97.5% 频率下的地热资源总量分别为: 230.04×10^{14} kJ、 211.29×10^{14} kJ、 192.47×10^{14} kJ 和 175.56×10^{14} kJ。而利用热储法计算 4 个热储层的资源总量为 200.95×10^{14} kJ。因此,75% 的热储温度频率可作为研究区热储温度变量的优选频率,与热储法计算结果标准差仅为 4.21%。

(3)基于热储特征分析和蒙特卡洛法的参数识别,能够有助于快速准确评价研究区地热资源量,在数据不足或热储层参数空间变异强烈的情况下,可以利用蒙特卡洛法的统计学优势有效评价地热资源量。

致谢:本次研究的野外工作得到了宁夏回族自治区水文环境地质勘察院的帮助和支持!匿名评审专家对本文提出了具体且非常宝贵的修改意见!在此一并致以最诚挚的感谢!

References

Abdul-Ghani O, Montaser M, Bassel S, Tabbi W, Mohamad R. 2020. Geothermal based hybrid energy systems, toward eco-friendly energy approaches. *Renewable Energy*, 147: 2003~2012.

Anthony E C, Sadiq J Z, Golbon Z. 2020. Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119: 109515.

Chiara M, Jan P, Edda S A, Ingvi G, Andri S. 2018. Towards 'green' geothermal energy: Co-mineralization of carbon and sulfur in geothermal reservoirs. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 77: 96-105.

Detournay C, Hobbs B. 2015. Numerical simulations of convection cells in sedimentary basins with application to geothermal energy. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48: 2631~2636.

Hemant K S, Chandrasekharam D, Trupti G, Mohite P, Singh B, Varun C, Satish K S. 2016. Potential geothermal energy resources of India: A review. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 3(3~4): 80~91.

Heru B P, Marchel C S, Sutopo. 2020. Experimental design and response surface method in geothermal energy: A comprehensive study in probabilistic resource assessment. *Geothermics*, 87: 101869.

Hou Jianchao, Cao Mengchao, Liu Pingkuo. 2018. Development and utilization of geothermal energy in China: Current practices and future strategies. *Renewable Energy*, 125: 401~412 (in Chinese with English abstract).

Iglesias E R, Torres R J. 2003. Low-to medium-temperature geothermal reserves in Mexico: a first assessment. *Geothermics*, 32(4-6): 711~719.

Li Guoji, Wu Yanli, Bai Yonghui. 2017. Application of statistical analysis method in the evaluation of geothermal resources. *Engineering Technology (Full Text Version)*, (1): 282~283 (in Chinese with English abstract).

Li Jun. 2016. Research and Prospect of Geothermal Resources Exploration Work. *China Venture Capital*, (17): 157 (in Chinese with English abstract).

Li Ningbo, Li Xiang, Yang Junwei, Yu Yuan, Wang Lizhi. 2020. Application and development of geothermal energy in the regional energy utilization. *Urban Geology*, 15(1): 9~15 (in Chinese with English abstract).

Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China. *Geology in China*, 40(1): 312~321 (in Chinese with English abstract).

Lu Jingdan. 2019. Geothermal energy development in the new era energy environment. *Intelligent City*, 5(16): 78~79. (in Chinese with English abstract).

Manan S, Dwijen V, Anirbid S. 2018. Using Monte Carlo simulation to estimate geothermal resource in Dholera geothermal field, Gujarat, India. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 1: 83~95.

Nathenson M, Muffler L J P. 1975. Geothermal resources in hydrothermal convection systems and conduction-dominated areas. *US Geol. Survey Circular*, 726: 104~121.

Nicolas D, Kavin S, Lazar C, Krishna K, Sarada K. 2019. A review of heat recovery applications for solar and geothermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114: 109329.

Noah D A, Jef K C. 2019. A Monte Carlo-based framework for assessing the value of information and development risk in geothermal exploration. *Applied Energy*, 256: 113932.

Pathak V, Babadagli T, Majorowicz J A, Unsworth M J. 2014. Evaluation of engineered geothermal systems as a heat source for oil sands production in northern Alberta. *Natural Resources Research*, 23: 247~265.

Ren Guangyuan. 2019. Geothermal resource evaluation of Yinchuan Basin based on thermal storage method. *Inner Mongolia Environmental Sciences*, 31(12): 22~23 (in Chinese with English abstract).

Ren Guodeng. 2015. Talking about geothermal resources and reserves calculation method. *West-China Exploration Engineering*, 27(11): 108~110 (in Chinese with English abstract).

Sutopo W P, Heru B P. 2019. The development study of Karaha-Talaga Bodas geothermal field using numerical simulation. *Geotherm Energy*, 7: 21.

Tang Shengli, Li Pengfei, Jiang Pengfei, Zhang Yuping. 2020. Numerical simulation of high-efficiency heat transfer law of horizontal section of U-shaped geothermal well in Guanzhong area. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 40(1): 96~101 (in Chinese with English abstract).

Tine C, Kris W, Estelle P, Dries M, Kris P. 2019. The impact of policy measures on profitability and risk in geothermal energy investments. *Energy Economics*, 84: 104524.

Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 38(4): 448~459 (in Chinese with English abstract).

Wang Zhixiang, Wen Jinmei, Li Delong. 2015. Application of thermal energy storage method in calculating the geothermal resources reserves—Taking the geothermal field in Chongqing Banan for example. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 11(S1): 342~346 (in Chinese with English abstract).

Yan Baizhong, Sun Jian, Jiang Haiyang, Li Yingpeng, An Na.

2019. Study of characteristics and reserves of geothermal resources in Dongying district, Shandong. Journal of Shijiazhuang University of Economics, 42(5): 22~27 (in Chinese with English abstract).

Yin Yulong. 2018. The assessment of geothermal resources potential of China. Science and Technology & Innovation, (5): 57~58 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jinhua, Wei Wei. 2011. Geothermal resource distribution and its utilization in China. Natural Resource Economice of China, (8):25~26+30+56~57 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhi, Lin Li, Chen Xiaojuan. 2008. The analysis on climate change characteristics in Yinchuan plain. Journal of Arid Land Resources and Environment, (6): 68~72 (in Chinese with English abstract).

Zhou Zongying, Liu Shiliang, Liu Jinxia. 2015. Study on the characteristics and development strategies of geothermal resources in China. Journal of Natural Resources, 30(7):1210~1221 (in Chinese with English abstract).

Zhu Xi, Zhang Qinglian, Liu Yanguang. 2016. Evaluation of the geothermal resources in the plain of west Shandong Province. Geological Science and Technology Information, 35(4):172~177 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

侯建超,曹梦超,刘平国. 2018. 我国地热能源的开发利用:目前的实践和未来的战略. 可再生能源,125:401~412.

李国记,吴艳丽,白永辉. 2017. 统计分析法在地热资源评价中的应用. 工程技术(全文版), (1):282~283.

李军. 2016. 地热资源的勘探工作研究与展望. 中国科技投资, (17):157.

李宁波,李翔,杨俊伟,于湲,王立志. 2020. 地热能在区域能源领域

中的应用和发展. 城市地质,15(01):9~15.

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. 中国地质,40(1):312~321.

陆静丹. 2019. 新时代能源环境下的地热能开发. 智能城市,5(16): 78~79.

任光远. 2019. 基于热储法的银川盆地地热资源评价. 环境与发展, 31(12):22~23.

任国澄. 2015. 浅谈地热资源及储量计算方法. 西部探矿工程,27(11):108~110.

唐胜利,李鹏飞,姜鹏飞,张育平. 2020. 关中地区 U 型地热井水平井段高效换热规律数值模拟. 西安科技大学学报,40(1):96~101.

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. 地球学报,38(4):448~459.

王治祥,温金梅,李德龙. 2015. 热储法在地热资源评价中的应用——以重庆巴南区地热田为例. 地下空间与工程学报,11(S1):342~346.

闫佰忠,孙剑,江海洋,李迎鹏,安娜. 2019. 山东省东营市东营区地热资源特征及储量评价. 河北地质大学学报,42(5):22~27.

尹玉龙. 2018. 中国地热资源及其潜力评估. 科技与创新, (5):57~58.

张金华,魏伟. 2011. 我国的地热资源分布特征及其利用. 中国国土资源经济, (8):25~26+30+56~57.

张智,林莉,陈晓娟. 2008. 银川平原气候变化特征分析. 干旱区资源与环境, (6):68~72.

周总瑛,刘世良,刘金侠. 2015. 中国地热资源特点与发展对策. 自然资源学报,30(7):1210~1221.

朱喜,张庆莲,刘彦广. 2016. 基于热储法的鲁西平原地热资源评价. 地质科技情报,35(4):172~177.

Calculation of geothermal resources based on parameter identification
——a case study from the western slope of the Yinchuan plain

HE Yujiang^{*1)}, DING Xiang²⁾

1) *The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Geothermal and Dry Hot Rock Exploration and Development Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, 050061;*

2) *College of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan, 454159*

** Corresponding author: heyujiang86@163.com*

Abstract

Through ground temperature monitoring, identification of aquifer structures and lithologic structures, this paper analyzes the characteristics of ground temperature field and the distribution law of thermal reservoirs in the western slope region of the Yinchuan plain, determines the random variables of thermal storage, and uses Monte Carlo statistical means such as the frequency distribution and the triangular distribution to identify the parameters of random variables, and calculates the amount of geothermal resources in typical areas by means of thermal storage method. The research results show that the geothermal field of the Yinchuan plain is a deep-cycle low-temperature and low-temperature conductive geothermal system, which is divided into 5 tectonic zones (Western Slope Area, Central Deep Area, Eastern Slope Depression Area, Eastern Slope Rise Area and Southern Slope Area) and 4 thermal reservoirs (the Neogene Gangouhe Formation and the Hongliugou Formation, the Paleogene Qingshuiying Formation, the Ordovician Majiagou Formation). There is a positive correlation between the temperature of vertical ground temperature field and the depth of formations in the study area. The geothermal resources are abundant in this area, and the main thermal reservoirs are located at the 400~800m. The random variables are thermal storage temperature, rock porosity, rock specific heat capacity and rock density. The geothermal resources of western slope with temperature random frequency of 25%, 50%, 75% and 97.5% range from 175.56×10^{14} kJ to 230.04×10^{14} kJ, among which the frequency of 75% can be selected as the optimal choice for the temperature random variable in the study area. The standard deviation between the geothermal resources reserves and the thermal storage method stratification calculation results is only 4.21%. The strong spatial variation of thermal reservoir parameters can be overcome by using thermal storage characteristic analysis and Monte Carlo method parameter identification, which provides a novel method for rapid and accurate evaluation, scientific exploitation and utilization of the geothermal resources.

Key words: geothermal resources; parameter identification; random frequency; triangular distribution; heat storage characteristics