

开封凹陷区地热资源评价

朱晓强,马传明,卢星辰

(中国地质大学环境学院,湖北 武汉 430074)

摘要 开展开封凹陷区地热资源定量评价,为合理开发利用地热资源提供科学依据。采用改进的均匀布井法计算地热水可开采量,采用热储法计算地热能总量、采用回采系数法和地热水可开采量换算法计算地热能可开采量。计算和评价结果表明 在开采期限 30 年、水位最大允许降深 50 m 条件下,开封凹陷区的地热水可开采量为 $105\,345.1\text{ m}^3/\text{d}$,地热能总量、可开采量分别为 $283.906\,9\times 10^{15}\text{ kJ}$ 和 $236.554\,2\times 10^{12}\text{ kJ}$ 。

关键词 凹陷区 地热资源 可开采水量 地热能 开封市

中图分类号 :TV211.1+2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)S1-0057-04

在我国,随着国民经济的快速发展和人们生活质量的大幅度提高,资源、能源(特别是水资源)的供需矛盾日益突出。集资源和能源于一身的地热水具有开采便利、成本低廉、利用方便、无环境污染等优点。河南省开封凹陷区地热资源丰富,其热能远未得到充分利用,开发利用前景乐观。开展开封凹陷区地热资源评价工作,为合理开发利用当地地热资源提供科学依据,尽快将资源优势转化为经济优势,对提高人们的生活质量、促进经济社会和谐发展具有十分重要的意义。

1 研究区地质环境背景

研究区——开封凹陷区位于东经 $113^{\circ}30'\sim 115^{\circ}30'$,北纬 $34^{\circ}30'\sim 35^{\circ}23'$,面积约 $6\,704\text{ km}^2$ 。研究区属于济源—开封凹陷的一部分,济源—开封凹陷属中、新生代凹陷,南侧为郑州—兰考断裂,北侧为新乡—商丘断裂,中间为武陟凸起,西为济源凹陷,东为开封凹陷。受济源—新乡—商丘深断裂长期活动影响,使济源—开封凹陷呈现为东西两端深、中间高,南浅北深箕状凹陷^[1]。自新生代以来,研究区沉积了厚达 $3\,000\sim 3\,500\text{ m}$ 的新生界地层,其中一系列黏土和砂层(半固结黏土岩、砂岩)相互重叠,组成了多层含水层组(热储层)和相对隔水层,新近系之上又覆盖了约 300 m 厚的第四系地层,为地热的形成提供了良好的赋存条件。

研究区地热水的主要补给来源为区外西部山区

大气降水,垂向补给不明显。天然条件下,地下热水流向由西向东或由西南向东北。地下热水的主要排泄方式为人工开采。

2 地热资源评价

根据研究区社会经济发展规划和目前地热开采技术经济条件,本次地热资源评价深度为 $300\sim 1\,300\text{ m}$ 范围,其中温水层的热储岩性以薄层细砂为主,地热资源评价深度为 $300\sim 800\text{ m}$ 范围;温热水层的热储岩性以厚层中砂和中细砂为主,地热资源评价深度为 $800\sim 1\,300\text{ m}$ 范围;热水层的热储岩性以细砂、中砂和黏土互层为主,地热资源评价深度为 $1\,300\sim 3\,000\text{ m}$ 范围。笔者将从水量、热量 2 个方面进行评价。

2.1 地热水可开采量评价

2.1.1 概念模型

根据地热井钻探资料,研究区各热储层岩性较均一,热储岩性为细砂或中细砂,顶底板基本水平,厚度变化不大,地下热水水平径流缓慢,不同热储层间地下热水的垂向上水力联系微弱。因此,研究区热储层可概化为无越流补给(或排泄)、水平方向无限分布、均质各向同性的承压热水层,在开采条件下为非稳定静储量消耗型。

2.1.2 数学模型

根据研究区地热储概念模型,研究区地热水可开采量的计算选用均匀布井法。均匀布井法是选用

泰斯井流公式 $s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u)^{[2]}$ 计算地热井均匀布局条件下,一定降深时的可开采热量。该方法适用于大面积分布水平层状孔隙含水层,是目前中低温地热资源计算的有效方法之一。但传统的均匀布井法在计算过程中单井抽水量 Q 由人为给定,故井数 n 具有一定的随意性。即确定的计算区地热井布局方案并不一定是最合理的。合理的布局方案是以同样的开采井数可开采水量最大为原则。为此,引进改进的均匀布井法。

改进的均匀布井法考虑到开采过程中的井群间干扰,含水层上方将出现 1 个区域减压层(图 1)。相应的计算公式为

$$Q = \frac{4\pi T(s - \Delta H)}{\ln \frac{2.25at}{r_w^2}} \tag{1}$$

其中 $\Delta H = \frac{Qt}{\mu_e f} \tag{2}$

式中 ΔH 为疏干层厚度, m; f 为单井的疏干影响面积, m^2 ; μ_e 为弹性给水度; r_w 为井半径, m。其余符号意义见文献[1]。

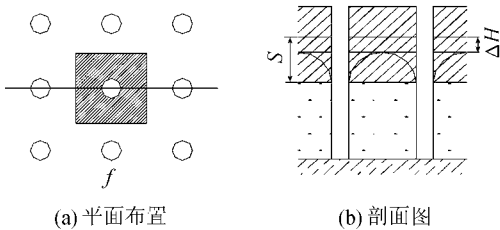


图 1 干扰井抽水示意图

根据式(1)、式(2)可得出开采期末最大允许水位降深 S_{max} 时计算区单位涌水量的计算式:

$$\frac{Q_{总采}}{S_{max}} = \frac{4\pi Tn}{\ln \frac{2.25at}{r_w^2} + \frac{4\pi atn}{A}} \tag{3}$$

式中 S_{max} 为开采期末最大允许水位降深, m; n 为井数, 个; A 为计算区面积, m^2 。其余符号意义见文献[1]。

2.1.3 计算参数

根据研究区地热地质条件,计算参数分区见图 2。计算参数见表 1,其中弹性给水度、导水系数、压力传导系数主要依据野外试验[3]确定。

关于开采年限和设计最大降深的确定:评价地下水允许开采量还要涉及开采期限问题。如果为稳定开采,则可保证无限期开采;若为非稳定开采,则应给出开采时间,评价在开采期限内水位降深不超过允许降深。对于开采期限,有人主张取 100 年,有人主张取 50 年,还有人认为取 10000 d(约等于 27.4 年)就足够了。最后一种主张具有一定的道理,因为这个期限对于集水建筑物的折旧期限足够了。另



图 2 研究区计算参数分区

表 1 研究区地热水可开采量计算参数

分层	分区	热储面积 A/km^2	热储厚度 M/m	弹性给水度 $\mu_e/10^{-3}$	导水系数 $T/(m^2 \cdot d^{-1})$	压力传导系数 $\alpha/10^4$
温 水 层 (300 ~ 800 m)	I	2497	240	3.0	412.80	13.76
	II	378	228	3.4	330.60	9.72
	III	1730	210	5.4	243.60	4.51
	IV	2099	149	3.8	508.09	13.40
温热水层 (800 ~ 1300 m)	I	2497	170	1.1	178.50	16.23
	II	378	182	0.8	74.62	9.33
	III	1730	138	1.6	139.38	8.71
	IV	2099	170	1.0	83.30	8.33
热 水 层 (1300 ~ 3000 m)		6704	150	3.4	3.75	0.11

外,到时候可再根据多年的开采资料更新评价或设法补充地下水资源,所以评价时不必考虑太长的开采期。笔者在评价中的设计开采年限取 30 年,计算在水位最大允许降深为 50 m 条件下地热水的允许开采量。井半径 r_w 取 0.08 m,开采井布局方案选择正方形均匀布井方案。

2.1.4 计算过程

将已知数据代入式(3)可求得改进的均匀布井方案下不同井间距时的 $Q_{总采}/S_{max}$,并绘制相应的 $Q_{总采}/S_{max} \sim n$ 关系曲线。在 $Q_{总采}/S_{max} \sim n$ 关系曲线上选择曲线变化陡峭和平缓的分界点,此点处的 n 和 $Q_{总采}/S_{max}$ 即为研究区均匀布井时最合理的井数和单位涌水量,相应的井距和设计降深时的地热可开采水量也可确定(表 2)。

表 2 研究区地热水可开采量计算成果

分层	分区	井间距 r_0/km	井数 $n/个$	每个计算区地热水总可开采量 $Q_{总采}/(m^3 \cdot d^{-1})$
温水层	I	3.1	260	674.86
	II	3.1	39	115.17
	III	3.1	180	820.30
	IV	3.2	205	703.50
温热水层	I	3.2	244	247.80
	II	3.2	37	27.03
	III	3.2	169	246.92
	IV	3.1	218	187.44
热水层		3.1	718	787.00

注 研究区地热水总可开采量 $\sum Q_{总采} = 105\,345.1\,m^3/d$ 。

2.1.5 地热可开采水量评价

计算结果表明,研究区各热储层在水位最大允许降深 50 m 以及 30 年的开采期限条件下,正方形均匀布井时可开采地下热水量为 105 345.1 m³/d。由于改进的均匀布井法考虑了布井条件及地下热水动态的非稳定性,因此以改进的均匀布井法计算研究区的地热水可开采量是可行的。

2.2 地热能评价

2.2.1 热能总量的计算

采用热储体积法计算研究区的地热能总量。

2.2.1.1 计算公式

$$Q_r = AM[\rho_r C_c(1 - \varphi) + \rho_w C_w \varphi](t_r - t_0) \quad (4)$$

式中:Q_r为地热储量;A为热储面积;M为热储平均有效厚度;ρ_r为热储介质平均密度;C_c为热储介质平均比热容;ρ_w为地热水平均密度;C_w为地热水平均比热容;φ为热储介质平均孔隙度;t_r为热储平均温度;t₀为当地恒温带温度。

2.2.1.2 计算参数

计算参数主要结合野外测试成果^[3]、华北盆地相同地热储层热力学参数并参考 DZ 40—1985《地热资源评价方法》^[4]确定(表 3)。研究区恒温带温度 t₀ 取 15.9℃^[5]。其他计算参数见表 1。

表 3 研究区地热能计算参数

分层	分区	比热容/ (kJ/(kg·℃) ⁻¹)		密度/ (kg·m ⁻³)		孔隙度 φ/%	渗透系数 K/ (m·d ⁻¹)	热储温度 t _r /℃
		岩层	热水	岩层	热水			
		c _c	c _w	ρ _c	ρ _w			
温水层 (300~800 m)	I	0.921 1	4.186 8	1 650	1 000	39	1.72	36.7
	II	0.921 1	4.186 8	1 650	1 000	37	1.45	34.9
	III	0.921 1	4.186 8	1 650	1 000	37	1.16	39.0
	IV	0.921 1	4.186 8	1 650	1 000	37	3.41	38.3
温热水层 (800~1 300 m)	I	1.004 8	4.186 8	1 670	1 000	33	1.05	50.5
	II	1.004 8	4.186 8	1 670	1 000	30	0.41	47.4
	III	1.004 8	4.186 8	1 670	1 000	33	1.01	54.3
	IV	1.004 8	4.186 8	1 670	1 000	30	0.49	53.2
热水层 (1 300~3 000 m)		1.004 8	4.186 8	1 750	1 000	20	0.025	65.5

2.2.1.3 计算成果

将计算参数代入式(4)可求得研究区的地热能总量(表 4)。

2.2.2 地热能可开采量计算

一般而言,地热能是以水为载体被开采出来的,因此,一定深度内的热能总量并不能全部被开发利用,而是其中一小部分。本次地热能可开采量的计算方法采用回采系数法和可开采水量换算法。

2.2.2.1 回采系数法

计算公式为

$$Q_{\text{采热}} = \alpha Q_{\text{总热}} \quad (5)$$

式中:Q_{总热}为地热能总量;α为回采系数,根据 DZ 40—1985《地热资源评价方法》,松散层热储取 α = 0.25;Q_{采热}为地热能可开采量。

表 4 研究区地热能总量

分层	分区	热能总量 Q _r /10 ¹⁵ kJ	折合标准煤/10 ⁸ t
温水层	I	31.903 4	4.43
	II	4.103 1	0.57
	III	21.017 7	2.92
	IV	17.542 7	2.44
温热水层	I	36.802 0	5.11
	II	5.275 4	0.73
	III	22.985 5	3.19
	IV	32.394 0	4.53
热水层		111.913 2	15.50
合计		283.906 9	39.42

根据式(5),利用表 4 中相应的数据可计算出研究区的地热能可开采量(表 5)。

表 5 研究区地热能可开采量

分层	分区	热能总量 Q _r /10 ¹⁵ kJ	折合标准煤/10 ⁸ t
温水层	I	7.958 6	1.107 5
	II	1.025 8	0.142 5
	III	5.254 4	0.730
	IV	4.396 1	0.610
温热水层	I	9.211 0	1.280
	II	1.339 8	0.180
	III	5.736 0	0.800
	IV	8.093 1	1.123
热水层		27.980 4	3.875
合计		70.966 3	9.850

2.2.2.2 可开采水量换算法

计算公式:

$$Q_{\text{采热}} = Q_{\text{采水}} \rho_w C_w (t_r - t_0) \quad (6)$$

式中:Q_{采水}为某一计算区的地热水可开采量,m³。

根据式(6)对研究区各地热储层的可开采热量进行计算(开采期限 30 年),结果见表 6。

表 6 研究区地热能可开采量

分层	分区	Q _{采水} /10 ⁸ m ³	E _分 /10 ¹² kJ
温水层	I	1.48	22.692 5
	II	0.25	3.684 4
	III	1.80	29.349 5
	IV	1.54	24.702 1
温热水层	I	1.36	28.679 6
	II	0.15	2.930 8
	III	1.35	30.731 1
	IV	1.03	22.859 9
热水层		2.59	70.882 5

注:E_总 = 236.554 2 × 10¹²kJ。

从表 5、表 6 可知,可开采水量换算法所得的可开采热量明显小于回采系数法的计算结果。

2.2.3 地热能评价

利用热储体积法计算出研究区地热储层的热能总量,结果为 $283.9069 \times 10^{15} \text{ kJ}$,相当于 $39.42 \times 10^8 \text{ t}$ 的标准煤所具有的能量。这里仅计算各热储层中所含地热能,黏土层未考虑于其中,这是由于黏土的透水性差,其所含热量不能以水为载体被采出。

对比表 4、表 5、表 6 得出,利用回采系数法计算的地热能可开采量远大于由可开采水量换算法计算所得的地热能可开采量。这是由于地热能量的开发利用主要以水为载体,在沉积盆地热储不考虑岩石中储存的热量,因此认为由可开采水量换算法计算的可开采热量比较符合实际。

3 结 论

在开采期限 30 年、最大允许降深 50 m 条件下,

(上接第 44 页)

在其余点处,工程后的流速均小于工程前的流速。在河道工程布置位置的北岸(点 3)流速有所上升,而 2 个潜坝中间位置(点 2)底层流速和表层流速都相应减小,这是因工程实施后,河道主流向北岸偏移所致。

4 结论与建议

该整治研究采用全流域河网模型结合局部河段的二、三维数值模型模拟技术,分析了不同典型年最不利条件下河道流速场的分布特征;依据现状水动力特征拟定了整治的基本措施,逐步深入地分析不同的组合方案,对比分析拟定整治方案下河道流态的变化情况,确定主流居中,顺直自然的优化整治方案。结论如下:

a. 太湖流域河网模型计算成果分析显示,流域十大骨干工程实施后黄浦江上游 3 支来水比例发生了变化。由于杭嘉湖地区洪水南排杭州湾效果显著,大泖港净泄量将会显著减少,园泄泾净泄量比原来也有所减少。由于斜塘来水较大,大部分涨潮流被逼进入大泖港和园泄泾,从涨潮流量看,园泄泾和大泖港涨潮流远远大于拦路港和太浦河,而且涨潮流历时也长。

b. 基本流态计算表明,涨潮时偏向南岸的河道主槽流速大,北岸浅滩流速小。落潮流态也相似。大流速区明显偏向南岸,正是由于现状较低标准的

开封凹陷区的地热水可开采量为 $105\,345.1 \text{ m}^3/\text{d}$,地热能总量为 $283.9069 \times 10^{15} \text{ kJ}$,地热能可开采量为 $236.5542 \times 10^{12} \text{ kJ}$ 。

参考文献:

[1] 河南省地质工程公司. 豫北平原地热资源调查报告[R]. 郑州: 河南省地质调查院,2003.
[2] 陈崇希,林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社,1999: 71-72.
[3] 河南省第二水文地质工程地质队. 河南省开封凹陷区地热资源计算与评价报告[R]. 郑州: 河南省地质矿产开发局,2007.
[4] DZ40—1985 地热资源评价方法[S].
[5] 王心义,李建华,林学钰,等. 开封市地热系统特征[J]. 水科学进展,2002,13(2): 192-196.

(收稿日期 2009-10-16 编辑 高建群)

河道堤防和局部滩地造成了不利的流势条件,对南岸的弯道形成顶冲之势,导致河岸冲刷加剧,形成局部的险段。

c. 大泖港河底刷深显著,主槽严重偏向南岸,河底高程约为 $-7.60 \sim -16.00 \text{ m}$,而且在弯道及河道交汇处形成 5 个河底深潭。综观 5 个深潭有互为犄角,形成发育成长之势。有必要采取相应的工程措施切断局部深潭的发展,同时遏制偏南主槽继续向南岸迁移。

d. 计算分析论证了 4 组方案。推荐方案 4 为整治工程优选方案。分析表明:方案 4 实施后能够有效起到导流作用,不会造成北岸滩地的过度冲刷,而且也不会影响下游黄浦江干流段堤岸的防汛安全。

参考文献:

[1] 钱宁,张仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社,1987.
[2] 姚文艺,王卫红,李勇. 基于河势稳定原理的黄河游荡性河道整治机制研究[J]. 水利学报,2007(10): 1172-1177.
[3] 汪德. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社,1989.
[4] 程文辉. HOHY22 模型使用手册[M]. 南京: 河海大学出版社,2000.
[5] WL Delft Hydraulics. User manual Delft 3D-Flow [M]. Netherland: Delft Hydraulics,1999.

(收稿日期 2009-04-16 编辑 方宇彤)