

调峰地下含水层储气库库址优选定量决策方法

康永尚^{1,2}, 杨帆², 刘树杰²

1. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249

摘要: 含水层地下储气库和枯竭油气藏地下储气库是国外地下储气库的重要类型, 我国油气藏主要富集在陆相地层中, 油气藏的规模比较小, 利用枯竭油气藏建造地下储气库的潜力受到一定的限制, 而在古生界海相沉积地层中寻找含水层圈闭进行天然气储气库建设, 有望建立起规模巨大的含水层地下天然气储气库, 与国外经验不同的是, 在我国含水层中建设地下储气库与枯竭油气藏地下天然气储气库相比, 成为更为有利的选项. 针对调峰地下含水层储气库库址优选问题, 引入气藏工程方法, 在考虑天然气消费调峰需求、含水地层渗透性、埋深、圈闭规模、钻井费用和压缩机费用等因素的基础上, 建立单井注/采气量、注/采气井数的压气机功率的联立方程, 求解单个含水层圈闭建库的最优投资额, 进而根据不同含水层圈闭建库的折算费用差额和投资回收期, 优选最有利的含水层圈闭作为进一步评价的对象, 使含水层储气库库址的优选建立在定量评价和决策的基础上, 为我国大规模开展含水层储气库建设提供技术支持.

关键词: 天然气; 地下储气库; 含水层; 调峰; 优选.

中图分类号: P 618.13

文章编号: 1000-2383(2007)02-0235-06

收稿日期: 2006-03-30

Method of Quantified Optimization Selection of Aquifer Traps as Underground Natural Gas Storages for Peak Demand Modulation

KANG Yong shang^{1,2}, YANG Fan², LIU Shu jie²

1. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, China of University Petroleum, Beijing 102249, China

2. Faculty of Natural Resources and Information Technology, China of University Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: Natural gas storages become more and more important in China with an increasing consumption of natural gas. Aquifer traps and depleted oil and gas pools are main types of underground natural gas storages in the world. However, in China, petroleum provinces are generally far from big cities and petroleum is mostly often produced from lacustrine deposit which is highly inhomogeneous, limiting the potential of storage capacities. Therefore, we suggest that aquifer traps of Paleozoic marine deposit should be explored as the main type of underground storages of natural gas in China. In this paper, gas engineering methods are introduced to formulate a method of quantified optimization selection of aquifer traps as underground natural gas storages. The parameters, like peak demand of natural gas, aquifers' permeability, bury depth, volume of traps, drilling and compressor power cost, and a group of combined equations related to these parameters are established. The resolution of these combined equations leads to an optimization of investment for each trap. By comparing the discounted investments and pay off of all the traps, one trap could be selected as the favorite to be constructed as underground natural gas storage. The gas engineering methods make the optimization selection of aquifer traps based on quantified evaluation, which will provide technical support for constructing aquifer traps in China.

Key words: natural gas; underground storages; peak demand modulation; aquifers; optimization selection.

21世纪是天然气的世纪, 随着我国天然气生产和消费市场的逐渐成熟和完善, 天然气储备作为不

基金项目: 中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目(No. 2002CX1).

作者简介: 康永尚(1964-), 男, 教授, 主要从事油气勘探地质、地下地质工程和海外油气工程项目技术经济评价等方面的教学和科研工作.

E-mail: kangysh@sina.com

可或缺的一个重要环节,已越来越引起有关方面的重视.国外经验表明,天然气地下储备从安全性和经济性两方面均优于地面储备,从投资效用来看,以天然气形式直接储存于地下优于以液化气形式储存于地下,在枯竭油气藏中储存优于在含水层中储存,在含水层中储存又优于在盐穴中储存;从储存量上来看,在枯竭油气藏和含水层中储存天然气成为天然气储存的主要形式,在盐穴中储存成为天然气地下储存的重要补充,在废弃矿坑中储存天然气有一些实例,在衬砌岩洞中储存天然气是一种正在探索的新方式(Katz and Tek, 1981; Лобанова, 1999; Favret, 2003).

地下储气库是一套储存和释放天然气的人工系统.地下储气库最基本的用途是调节由于季节变化引起的天然气供需不平衡.从技术和经济角度考虑,长输管线以恒定的量输送天然气,但天然气的消费存在季节变化.一般来说,天然气的冬季月均需求量是夏季月均需求量的 1.5~2 倍,甚至 3 倍,如果按照最大日需求量来计算,冬季的需求量可达到夏季需求量的 10~15 倍(苗承武和尹凯平, 2000).地下储气库的另一个重要作用是用于天然气的战略储备,以保障长输管线供气中断情况下天然气的有效供给.

利用含水层建立地下储气库在我国有良好的发展前景(苗承武和尹凯平, 2000; 展长虹等, 2001; 丁国生和李文阳, 2002).我国油气藏主要富集在陆相地层中,油气藏的规模比较小,建库的潜力受到一定的限制,而在古生界海相沉积地层中寻找含水层圈闭进行天然气储气库建设,有望建立起规模巨大的含水层地下天然气储气库,与国外经验不同的是,在我国含水层中建设地下储气库与枯竭油气藏地下天然气储气库相比,成为更为有利的选项.

本文在吸收国外含水层储气库建库经验的基础上,针对调峰地下含水层储气库提出库址初选、优选的方法体系,引入气藏工程方法,使含水层储气库的选址问题具有定量评价和决策的依据.

1 含水层地下储气库的初选

含水层储气库的初选,是根据某一地区天然气用量在年度内的不平衡性来确定需求工作容积,计算出需求工作容积以后,就需要对该地区存在的地下含水层圈闭进行考察,计算圈闭的最大工作容积,最大工作容积大于需求工作容积的圈闭进入初选,

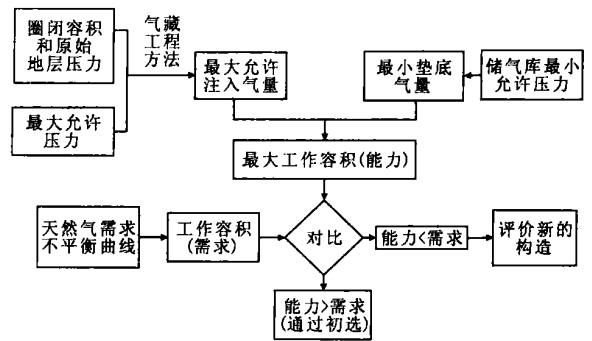


图 1 含水层地下储气库初选流程图

Fig. 1 Flow chart of primary selection of aquifer traps as underground natural gas storages

作为进一步评价进行优选的基础(图 1).

1.1 需求工作容积估算

对某个天然气消费城市而言,需求工作容积是城市消费季节不平衡调节量,可用式(1)计算:

$$Q_a = \sum_{i=1}^n (q_r - q_{im}), \quad (1)$$

式(1)中 q_r 为输气管线的年均供气量($q_r = Q_r/12$), $10^6 \text{ m}^3/\text{mon}$; q_{im} 为第 i 个月的实际用气量, 10^6 m^3 ; n 为月用气量小于平均用气量的月数.

1.2 圈闭最大工作容积估算

圈闭最大工作容积 Q_{ac} 是圈闭最大允许注入气量 Q 扣除最小垫底气量 Q_a 之后的容积,它反映了圈闭的工作能力:

$$Q_{ac} = Q - Q_a. \quad (2)$$

1.2.1 圈闭最大允许注入气量 Q 估算 圈闭最大允许注入气量是在含水层上覆地层不发生水力破裂的条件下,圈闭中可注入的最大气量,与圈闭容积、含水层温度、天然气偏差系数和圈闭最大允许压力有关,圈闭最大允许注入气量 Q 可由式(3)获得:

$$Q = V \frac{T_{sc} p_{max}}{p_{sc} T_i Z_i}, \quad (3)$$

式(3)中 V 为圈闭容积, 10^6 m^3 ; T_{sc} 为地面标准温度, 293 K; p_{sc} 为地面标准压力,一般取 0.1 MPa; T_i 为含水层的温度, K; Z_i 为天然气偏差系数, 小数; p_{max} 为圈闭最大允许压力, MPa, 是保证在注气过程中不出现水力压裂所允许的最大地层压力.

公式(3)中的圈闭容积 V 用式(4)计算:

$$V = Ah\varphi(1 - S_{wi}), \quad (4)$$

式(4)中, A 为圈闭面积, km^2 ; h 为含水层平均有效厚度, m; φ 为含水层的平均有效孔隙度, 小数; S_{wi} 为含水层的束缚水饱和度, 小数.

公式(3)中的圈闭最大允许压力 p_{max} 用式(5)计算:

$$p_{max} \leq p_c = \varphi p_s \quad (5)$$

式(5)中, p_c 为岩石能承受的最大侧压, MPa; $p_s = g \rho_{cp} H_0$ 为上覆地层静压, MPa ($\rho_{cp} = \sum g \rho_i h_i / H_0$ 为岩石平均密度; α 为系数, 无量纲, 可通过岩石的内摩擦角 φ 确定).

1.2.2 最小垫底气量估算 最小垫底气量是地下储气库运行过程中的一个重要参数, 它起到保持地层压力、防止采气井被水淹和保证储气库能够顺利地循环操作的作用. 垫底气量和注采气井数、储气层物性以及储气库中允许的最小压力有密切的关系, 最小垫底气量用式(6)估算:

$$Q_d = V \frac{T_{sc} p_{min}}{p_{sc} T_f Z_i} \quad (6)$$

式(6)中, V 为圈闭容积, 10^6 m^3 ; T_{sc} 为地面标准温度, 293 K; p_{sc} 为地面标准压力, 一般取 0.1 MPa; T_f 为含水层的温度, K; Z_i 为天然气偏差系数, 小数; p_{min} 为储气库最小允许压力, MPa, 是保证在采气过程中正常采出天然气所允许的最小地层压力.

由于储气库是可循环操作的, 在注、采气过程中, 储气库中最大允许压力、平均地层压力和最小允许压力有下面的关系(苗承武和尹凯平, 2000):

$$p_{max} - p_{min} = 2(p_{max} - p_{cp}) \quad (7)$$

由式(7)可以得到储气库最小允许压力为:

$$p_{min} = 2p_{cp} - p_{max} \quad (8)$$

由公式(2)计算的圈闭最大工作容积与由公式(1)计算的需求工作容积对比, 当 $Q_{ac} \geq Q_a$ 时, 说明所选圈闭可以作为当地提供调峰的储气库地址, 如果达不到要求, 就需要考察其他可能的圈闭, 直到找到合适的圈闭为止. 通过初选的圈闭, 进入下一步优选流程.

2 含水层地下储气库的优选

2.1 含水层地下储气库优选的思路

经过初选之后, 可能有多个地下含水层圈闭能满足需求工作容积的要求. 这时, 就需要对这些地下含水层圈闭进行优选.

地下储气库优选的原则是在考虑单个含水层圈闭所能承受的最大压力 p_{max} 、垫底气量、注/采气井的井数、压气机功率等几个主要参数的基础上, 确定单个含水层圈闭建库的最优总投资量, 进而通过不同含水层圈闭建库的折算费用差额和投资回收期的

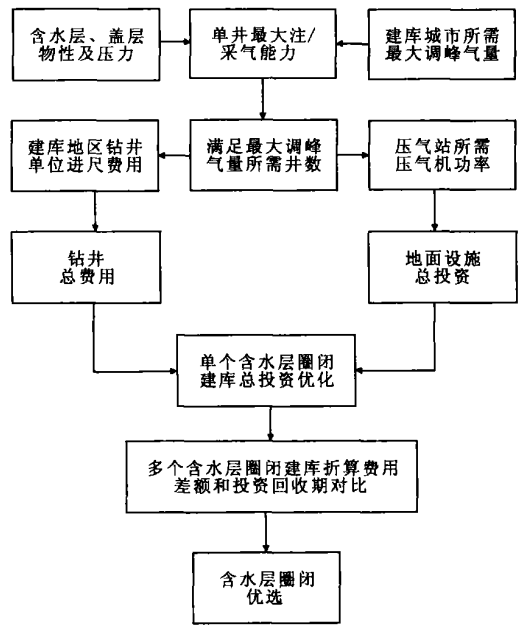


图 2 含水层地下储气库优选流程图

Fig. 2 Flow chart of optimization selection of aquifer traps as underground natural gas storages

对比, 优选出最有利的含水层圈闭作为进一步评价的对象(图 2).

2.2 单个含水层圈闭建库投资优化方法

单个含水层圈闭含水层地下储气库优选的具体步骤为:(1)利用含水层物性参数估算出单井的日注/采气能力;(2)根据建库城市天然气的调峰需求最大的月份所需的天然气调峰量即可计算出需要的注/采气井数;(3)根据管网压力和井底流压等参数, 估算压气机功率;(4)根据注/采气井数、钻井费用和压气机费用等各方程的联立求解, 得到单个含水层圈闭建库的最优投资总额(图 2).

2.2.1 地下储气库单井产气能力估算

根据气藏工程方法, 单井天然气地面流量可以用下面的公式计算(陈元千, 1999):

$$Q_g = \frac{\sqrt{(p_{wf}^2 - p_{wh}^2) d^5}}{\sqrt{1.2893 \times 10^{-16} F T_a Z_a^2 P_{sc}^2 (e^{S_m} - 1)}} \quad (9)$$

式(9)中 Q_g 为地面气体流量, m^3/d ; p_{wf} 为井底流压, MPa; p_{wh} 为井口压力, MPa; d 为油管内径, m; T 为平均油管温度, K; Z_a 为平均气体偏差系数; F 为莫氏摩擦系数; S_m 由式(10)求得:

$$S_m = \frac{0.06969 \gamma_w H_m}{T_a Z_a} \quad (10)$$

式(10)中 H_m 为测量井深, m; γ_w 为井内流体密度 (空气密度为 1.0)。

若气井为套管生产, 气体沿油套管环形空间流动则用 $(d_1 + d_2)(d_1^2 - d_2^2)$ 代替式(9)中 d^5 , 这时 p_{wh} 为井口套压力, MPa; d_1 为套管内径, m; d_2 为油管外径, m。

天然气气井井底流量可用公式(11)计算(陈元千, 1999):

$$Q_{sc} = \frac{774.6Kh(p_e^2 - p_{wf}^2)}{T^{\mu Z} \ln \frac{0.472r_e}{r_w + S + DQ_{sc}}} \quad (11)$$

式(11)中 p_e 为地层压力, MPa; p_{wf} 为井底流压, MPa; Q_{sc} 为标准状态下气产量, m^3/d ; K 为含水层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h 为含水层有效厚度, m; r_w 为井径, m; r_e 为储气库的外缘半径, m; μ 为气体粘度; Z 为气体压缩系数; T 为地层温度, K; S 为表皮系数; D 为紊流系数。

根据质量守恒定律, 气井地面气体流量与井底流量是相等的, 即 $Q_{sc} = Q_g$ 。这样通过地面气体流量公式与井底流量公式的联用, 就建立起了地层压力、地层物性、井底流压、井口压力之间的关系。

2.2.2 储气库所需最大注/采气井数的计算 由于地下储气库注/采气的基本原则是“注的进, 采的出”, 在储气库的一个注采周期内, 整个储气库的产气量和储气库内的压力是随时间不断地变化的, 在这个过程中, 注/采气井的数量也会有所变化, 因此在设计储气库时需要考虑储气库最大所需要的注/采气井数。

(1) 储气库所需最大采气井数的计算。储气库处于采气期时, 当储气库中的压力已经降到很低, 接近储气库的最小压力 p_{min} 时, 储气库采气井的单井产能最低, 为保证这时储气库能够满足建库城市的最大调峰量需求, 则需要较多的采气井来满足总的调峰气量, 这时所需的采气井数即为储气库最大采气井数。利用公式(9)和(11), 取公式中地层压力 $p_e = p_{min}$, 井口压力 p_{wh} 为输气管线内的压力, 可以计算出储气库采气井单井在这时所能提供的调峰气量, 再根据建库城市在天然气使用高峰期所需的日调峰气量与单井所能提供的调峰气量可以计算出储气库所需的最大采气井数。

(2) 储气库所需最大注气井数的计算。储气库处于注气阶段时, 当储气库中的压力升高到接近储气库最大压力 p_{max} 时, 单井注气能力降到很低, 为保证这时储气库能够满足建库城市的最大调峰需求, 则

需要较多的注气井向储气库注气, 这时所需的注气井数即为储气库最大注气井数。利用公式(9)和(11), 取公式中地层压力 $p_e = p_{max}$, 井口压力 p_{wh} 等于注气压缩机出口的最大压力, 可以计算出注气井单井在这时所能提供的最大注气能力, 再根据建库城市天然气使用最少的月份每日需要向储气库注入的气量可以计算出储气库最大所需注气井数。

一般地下储气库的气井都同时具有注气和采气的的能力, 在得到储气库最大所需采气井数和最大所需注气井数后, 取两者中大的数, 就是保证地下储气库能满足建库城市需求的注/采气井数(康永尚等, 2004)。

2.2.3 压缩机功率估算 储气库一般选用的压缩机为往复式气体压缩机, 可用于注气和采气。

在城市天然气月需求量低于管线供气能力的几个月份中, 压缩机处于注气阶段。由于输气管线的供气能力常年大约都是定值, 但用气城市每月用气量随季节变化, 每个月需要向储气库中注入的气量也不相同, 所以压缩机的工作状况变化范围较大, 对于注气量小范围内的波动可以利用调整单个压缩机的排量来实现, 对于大范围的注气量波动可选用调整压缩机组中工作压缩机的个数来实现。

在供气管线能力不能满足城市天然气需求量的月份中, 由于地下储气库的压力系统比输气管网系统的压力高, 一般不使用压缩机来采气, 但有时为了提高采气能力以满足短期内大量的天然气需求, 也可以使用压缩机采气。

常用的往复式压缩机理论功率计算公式:

$$HP = Q \times T_1 \times Z_1 \times \left[\frac{k}{k-1} \right] \times \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (12)$$

$$P = 0.95 HP \quad (13)$$

式(12)、(13)中 HP 为压缩机理论功率 W; P 为压缩机实际功率 W; Q 为压缩机流量, $10^6 m^3/d$; p_1 为压缩机入口压力, MPa; p_2 为压缩机出口压力, MPa; T_1 为入口温度, K; Z_1 为入口端天然气压缩因子; k 为天然气热容比。

根据天然气供需不平衡曲线可以得到在城市天然气使用量最低的月份每天需要向储气库内注入的日最大注入气量, 再根据所选用压缩机组的最大排量即可确定压缩机组所需要的压缩机台数。

2.3 含水层地下圈闭优选

通过前面单个含水层圈闭的最优(投资额最低)

建库方案的设计,得到每个圈闭建库的最低投资额,进而可根据多个含水层圈闭建库的折算费用差额和投资回收期等经济指标,优选最优的含水层圈闭,作为开展进一步评价工作的对象.

2.3.1 折算费用差额 用储气库补偿季节不平衡性,与用其他方法解决这一问题的费用相比,能使折算费用更节省.候选库的使用经济效益,可以作为折算费用的差额,由公式(14)计算(苗承武和尹凯平,2000):

$$\Delta F = [(0.12\Delta K_c + \Delta E_c) + (0.12\Delta K_n + \Delta E_n)] - (0.12K_x + E_x), \quad (14)$$

ΔF 为使用储气库获得的年折算费用节约,万元; $\Delta K_c, \Delta K_n$ 为提高输气管线和矿场的生产能力,需要向输气管线和矿场进行的补充投资,万元; $\Delta E_c, \Delta E_n$ 为输气管线和矿场补充的操作费用,万元/年; K_x, E_x 为向储气库的投资和储气库的操作费用,万元/年.

2.3.2 投资回收期 候选库的投资回收期,等于储气库的总投资除以使用储气库时输气系统整体得到的补充年收入的商值:

$$T = \frac{K_x}{\Delta D}. \quad (15)$$

使用储气库所得到的年补充收入 ΔD 用公式(16)计算(苗承武和尹凯平,2000):

$$\Delta D = E_1 \frac{Q_a}{Q_1} - (E_x + \Delta E). \quad (16)$$

式(15)、(16)中, ΔD 为使用储气库所得到的年补充收入,万元; E_1, Q_1 为不使用储气库时输气系统的操作费用和年输气能力; ΔE 为输气管线和矿场气体流量增大后,系统补充的操作费用,万元; E_x 为储气库的操作费用,万元; Q_a 为储气库的工作容积.

3 应用实例分析

根据上述理论和方法,我们研制出一套含水层地下储气库圈闭初选和优选的软件,下面为一模拟应用实例.

3.1 新建/选择工区

以北京市未来某年的天然气消费需求为例,点击系统初始化下的新建工区菜单,就可以开始在一个需要建储气库的城市开始建库的研究工作.点击新建工区菜单后,系统会跳出对话框,要求输入新工区的各项参数,主要为需要建库城市的天然气使用情况的参数.在城市名称中输入“北京”,管线年供气

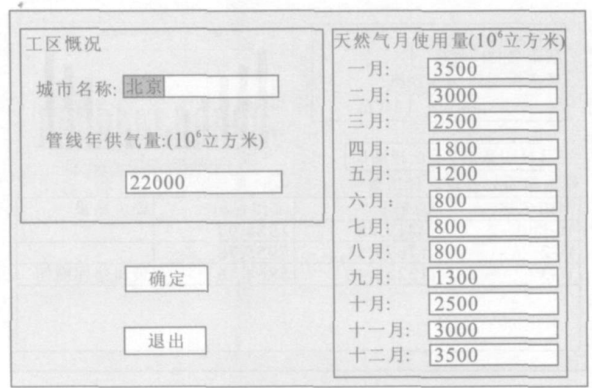


图 3 含水层地下储气库选址新建工区界面

Fig. 3 Input interface of new sites for selection of aquifer traps as underground natural gas storages

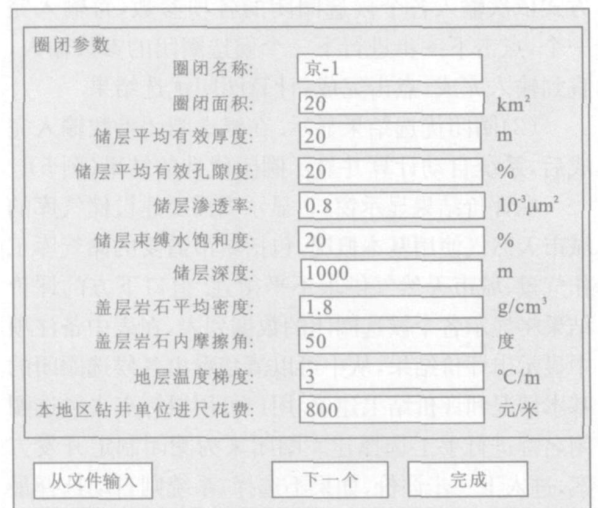


图 4 含水层地下储气库选址及参数设计优化系统参数输入界面

Fig. 4 Input interface of traps parameters for selection of aquifer traps as underground natural gas storages

量中输入北京市每年来自陕京天然气输气管道的天然气量,在天然气月使用量中输入北京市往年每月天然气使用量的平均数值(图 3).

点击选择工区则可以选择以前研究过的地区继续进行研究.

3.2 库址优选

(1) 候选圈闭参数输入. 点击系统主菜单上的库址选择,可进行选定的工区内各个候选圈闭参数的输入(图 4).

参数的输入可以通过事先建立文本文件的方式,然后在参数输入窗口点击从文件输入按钮来一次性输入各个候选圈闭的各项参数,也可以用手工

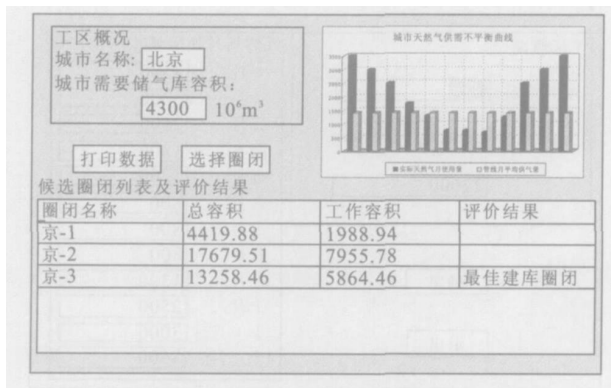


图 5 含水层圈闭建库选址优选择结果示例

Fig. 5 Interface showing the results of selection of aquifer traps as underground natural gas storages

方式依次输入各个候选圈闭的各项参数,每输入完一个,点击下一步进行下一个候选圈闭的参数输入,直到输入完成,点击完成,计算圈闭优选结果。

(2) 圈闭优选结果显示。在候选圈闭参数输入完成后,系统自动计算并显示圈闭优选的结果(图 5)。

在评价结果显示窗口,显示出需要建设储气库的城市天然气使用基本概况,包括城市需要的储气库工作气量、城市天然气供求不平衡性。窗口下方的评价结果将显示各个候选圈闭的数据列表,在表中备注项中显示出评价结果,从中可以清楚看出各候选圈闭的基本情况和评价结果建议。用户可用鼠标点击候选圈闭名称进行手工选择建库圈闭来为圈闭制定开发方案,进入下一步评价,如果不选择,系统则自动选择最佳建库圈闭制定储气库参数,为进一步评价做准备。

References

Chen, Y. Q., 1999. Practical methods of petroleum engineering. Petroleum Industry Press, Beijing, 230 (in Chinese).

Ding, G. S., Li, W. Y., 2002. State of art and development trend of underground natural gas storages in the world. *International Petroleum Economics*, 10(8): 23-26 (in Chinese with English abstract).

Favret, F., 2003. Review of state of art pertaining to storage of natural gas including research and development results. *Sofregaz*, France, 1-30.

Katz, D. L., Tek, M. R., 1981. Overview on underground storage of natural gas. *SPE* 9390, 265-288.

Miao, C. W., Yin, K. P., 2000. Design of underground natural gas storages in aquifers. *Petroleum Industry Press*, Beijing, 150 (in Chinese).

Zhan, C. H., Jiao, W. L., Lian, L. M., et al., 2001. Construction of underground natural gas storages in aquifers. *Natural Gas Industry*, 21(4): 88-90 (in Chinese with English abstract).

Лобанова, А. Н., 1999. Formation and production characters of underground natural gas storage in complex geological structure. *Natural Gas and Oil*, 17(4): 6-8 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈元千, 1999. 油气藏工程实用方法. 北京: 石油工业出版社, 230.

丁国生, 李文阳, 2002. 国内外地下储气库现状与发展趋势. *国际石油经济*, 10(8): 23-26.

苗承武, 尹凯平, 2000. 含水层地下储气库工艺设计. 北京: 石油工业出版社, 150.

展长虹, 焦文玲, 廉乐明, 等, 2001. 利用含水层建造地下储气库. *天然气工业*, 21(4): 88-90.

Лобанова, А. Н., 1999. 复杂地质构造中地下储气库的形成和生产特点. *天然气与石油*, 17(4): 6-8.