

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

## 试用有限单元法评价深层 地下卤水资源量

周 训

(中国地质大学, 北京)



用有限单元法评价浅层地下水资源量, 是人们十分熟悉的。但对深层地下卤水资源量的评价, 尚无完善的方法。本文对某储卤构造深层储卤层进行概化, 用有限单元法模拟卤水生产过程并作出预报, 提供了相应的结果。

预测一个卤水生产井或者一个储卤层可以开采的卤水资源量, 通常是在卤水开发的早、中期阶段需要解决的问题。但是, 对深层地下卤水资源量的评价一般来说是比较困难的。这是因为深层卤水埋深往往很大, 可达数百米乃至数千米, 以至于不可能象浅层地下水那样进行大量的勘探、试验和测试工作。深层卤水资源量评价的研究一直进展缓慢, 目前尚无成熟的评价方法。另一方面, 深层卤水具有某些显著的特点。深层地下卤水赋存于一定的层位之中, 并主要富集于某些构造部位(如背斜核部、断层带)。卤水在地下深处处于封闭状态, 天然条件下一般不发生侧向运移。深层卤水通常具有很高的测压水头, 一旦被钻井揭露后, 能有喷出地表(或经人工抽汲后)而被利用。深层卤水只有储存资源, 没有补给资源, 不能补充恢复。随着开采的继续进行, 储卤层压力逐渐降低, 卤水将日益消耗以至枯竭。因此, 从深层卤水的基本特点出发, 对一些进行过一定的勘探、试验工作并积累了较多的卤水生产资料的储卤层, 通过对实际资料的分析 and 概化, 有可能采用浅层地下水资源评价中常用的评价方法进行有关深层卤水资源量的计算。本文试用有限单元法对深层储卤层卤水进行模拟计算和预报。

在四川盆地中部有一储卤构造, 是一个隆起幅度很低的背斜构造。背斜轴近NE—SW走向, 长轴长约12km, 短轴长约4.5km, 两翼地层倾角均小于 $5^\circ$ , 未受断层破坏。该背斜自地表往下分布有侏罗纪和三叠纪地层。侏罗系为厚度巨大的泥岩、页岩夹砂岩。三叠纪地层深埋地腹, 上统须家河组为砂岩与页岩互层, 可分为六个层段; 中统雷口坡组和下统嘉陵江组为灰岩、白云岩夹硬石膏层。本文研究的储卤层为三叠系上统须家河组第六段( $T_3x^6$ )长石石英砂岩, 其顶埋深大于1880m, 标高低于-1541m。该储卤层只有位于背斜西南侧的盐5井, 自喷生产卤水。据10口钻井钻探资料分析, 该储卤层孔隙与裂隙发育, 卤水主要富集于背斜的隆起部位, 而且在盐5井附近为卤水相对富集区。 $T_3x^6$ 储卤层的顶板为侏罗系泥岩, 底板为须家河组第五段( $T_3x^5$ )页岩, 均为良好的隔水层, 卤水封闭条件极好, 并且可以忽略少量天然气的影响。

根据背斜圈闭状况、钻井卤水显示情况和卤水生产井的实际生产资料, 可以圈定 $T_3x^6$ 储卤层

的周围边界,并在盐5井附近划出一个卤水相对富集区,两个区均处理为均质和各向同性的。由于该背斜两翼地层倾角很小,可以认为储卤层是近似水平展布的。盐5井通过自喷生产卤水,实际生产资料表明,尽管卤水产量受到井口装置的限制而被人为调节,但卤水月产量和井口压力呈逐渐下降趋势,已由1980年4月的 $9\,175.3\text{m}^3$ 和 $86\text{kg}/\text{cm}^2$ 降至1987年8月的 $2\,730.9\text{m}^3$ 和 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ ,盐5井可视为一个变流量变降深的抽水井。根据以上分析,可以把盐5井生产 $T_3x^6$ 储卤层卤水概括为以下井流模型:周围具有隔水边界、侧向非均质、储卤层水平展布的变流量径向非稳定井流(如图1所示)。这一井流模型可以用以下定解问题描述:

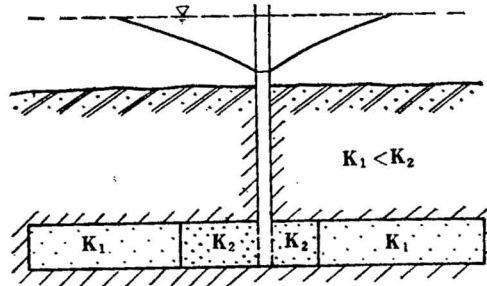


图 1 井流模型示意图

Fig. 1 Sketch of well model

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( MK_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( MK_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = S \frac{\partial H}{\partial t} \\ MK_x \frac{\partial H}{\partial x} dy - MK_y \frac{\partial H}{\partial y} dx = 0 \\ H(x, y, 0) = \text{已知} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $M$ —储卤层厚度 (m),  $K_x$ — $x$ 轴方向渗透系数 (m/d),  $K_y$ — $y$ 轴方向渗透系数 (m/d),  $H$ —水头高程 (m),  $S$ —储水系数,  $Q$ —抽水井流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ ).

用有限单元法求解定解问题 (1), 需要把计算区域剖分成若干个三角形单元, 并对每个单元和节点进行编号, 而且在抽水井附近的三角形单元要适当加密。 $T_3x^6$ 储卤层计算区域的面积为 $44.175\text{km}^2$ , 有两个非均质分区 (I区为弱含水区, II区为富水区), 可剖分成165个三角形单元, 95个节点 (见图2)。计算中采用的储卤层厚度是根据钻井揭露储卤层的卤水显示资料而确定得到的有效厚度, 为51m。 $T_3x^6$ 储卤层卤水的初始水头是根据原始地层压力采用式 (2) 通过换算得到的, 并视初始水头为水平的, 而且统一折算成海拔高程。

$$H = \frac{P}{\gamma} \cdot 10 + H_p \quad (2)$$

式中:  $H$ —水头高程 (m),  $P$ —压力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ),  $\gamma$ —卤水比重,  $H_p$ —储卤层中部高程 (m)。 $T_3x^6$ 储卤层原始地层压力为 $321\text{kg}/\text{cm}^2$ , 卤水比重为1.112, 储卤层中部标高为 $-1\,566\text{m}$ , 由此求得储卤层初始水头高程为 $1\,320\text{m}$ 。

由于各种原因, 抽水井 (即盐5井) 的实测流量是经常变化的, 而定解问题 (1) 描述的是定流量井流模型, 所以, 如何用定流量井流模型处理变流量井流问题, 是本文研究的难点。处理的办法是按照阶梯流量抽水的原理, 流量每变化一次, 就相当于在与原抽水井相同的位置增加一个井。当后一次流量比前一次大时, 就相当于增加一个抽水井, 以两次的流量差值抽水; 当后一次流量比前一次小时, 就相当于增加一个注水井, 以两次的流量差值注水, 而原来的井仍按前一次

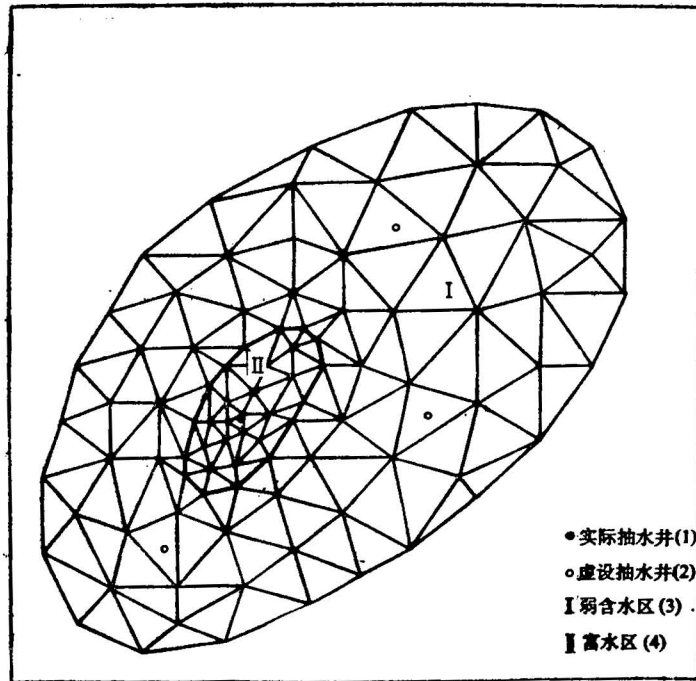


图 2 计算区域剖分图

Fig. 2 Split-map of calculated area

流量继续抽(或注)水。每一次均按定流量进行抽(或注)水计算。因此,原抽水井流量变化了多少次,就相当于在相同的位置有多少个井同时在抽(或注)水,流量开始变化的时刻就是新增加的井开始抽(或注)水的时刻,而在此之前,新增加的井是以零流量在抽水。

在实际计算时,必须预先对各个含水区给定参数的初值进行试算。在计算中涉及到的参数有渗透系数(包括主方向和次方向的渗透系数)、比弹性给水度,以及渗透系数主方向与所选取的横坐标轴的夹角,共有4个。由于已把富水区和弱含水区均处理为均质和各向同性的,所以两个区的主方向渗透系数和次方向渗透系数相同,而渗透系数主方向与横坐标轴的夹角为零度。因此,在实际计算中需要调试的参数只有渗透系数和比弹性给水度。渗透系数是根据岩心物性测试结果以及盐5井卤水生产初期的压力恢复曲线计算结果确定其初值的大致范围的。对于富水区,渗透系数的取值范围为 $n \times 10^{-3} \text{m/d}$ ,而弱含水区为 $n \times 10^{-4} \text{m/d}$ 。至于比弹性给水度,由于缺乏实际试验资料,可以人为地给出,不妨取较大和较小的数值(极端值)进行试算,逐渐确定出其取值范围,富水区为 $n \times 10^{-6}$ ,弱含水区为 $n \times 10^{-7}$ 。

实际模拟计算是根据盐5井1980年3月至1987年8月的实测产量计算出其水头值,用来模拟该井的实测水头,即对盐5井的实际生产过程进行模拟。计算过程中需要用到以下数据:①各单元编号和节点编号;②非均质分区编号;③位于边界上的节点编号;④抽水井所在单元编号;⑤各节点横坐标;⑥各节点纵坐标;⑦各节点储卤层顶、底板标高;⑧各节点初始水头标高;⑨抽水井初始流量;⑩抽水井流量变化所在的计算次数;⑪各次流量变化时相应的流量数值;⑫两个非均质分区的参数值。将以上数据全部输入计算机内,调用预先编制好的有限单元法计算程序<sup>①</sup>,取计算时间步长为两个月,按照预先给定的计算次数进行计算,输出最后一次计算时的各节点的

● 陈明佑编著,1987,地下水运动的数值解法(讲义)。

水头值和抽水井各次的计算水头值。然后利用抽水各次的计算水头值和实测水头值, 调用事先编制好的绘图程序, 绘出抽水井实测水头线和计算水头线, 观察模拟效果。不断改进富水区和弱含水区的参数值, 将上述过程重复多次, 直到实测水头线与计算水头线拟合得较为满意为止 (见图 3)。用此时的参数值进行预报。

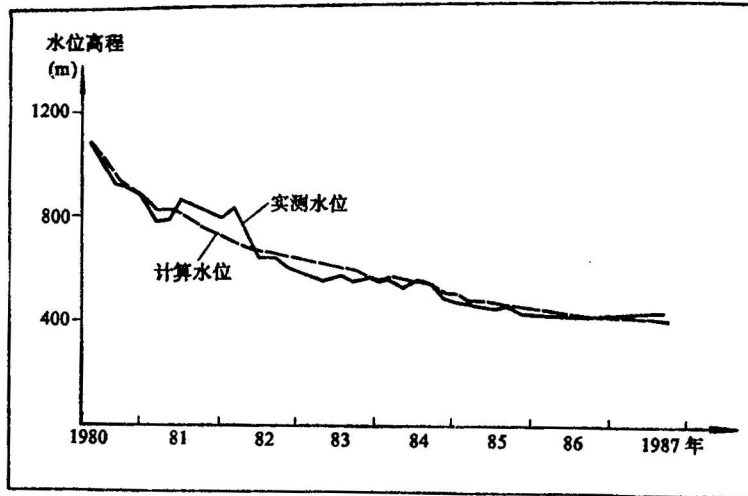


图 3 抽水井水位拟合图

Fig. 3 Fit of water level for pumping well

用有限单元法可以对  $T_3 \times 6$  储卤层的剩余可采资源量作出预报。由于  $T_3 \times 6$  储卤层卤水的测压水头很高, 而储卤层的厚度与测压水头相比小得多, 可以认为当水位降低到储卤层的顶板时所能开采出来的水量, 就是储卤层的卤水可采资源量。因此, 在预报阶段, 为了使整个储卤层的水位几乎全部到达储卤层的顶板, 除了原抽水井 (盐 5 井) 本身外, 还虚设了 3 个抽水井, 均匀地分布于整个储卤层之中 (见图 2), 并在原抽水井设置控制的最低水位标高。在模拟阶段的基础上, 原抽

表 1  $T_3 \times 6$  储卤层卤水资源量有限单元法计算结果表

Table 1 Schedule of brine resource of  $T_3 \times 6$  brine aquifer using finite element method

|             |         |                   |              |                      |
|-------------|---------|-------------------|--------------|----------------------|
| 非均质分区数      | 2       | 流量变化次数            | 45           |                      |
| 节点个数        | 95      | 预报开始时计算次数         | 46           |                      |
| 单元个数        | 165     | 预报结束时计算次数         | 125          |                      |
| 储卤层顶板标高 (m) | -1541.3 | 渗透系数 (m/d)        | 弱水区          | 0.00042              |
| 储卤层底板标高 (m) | -1592.3 |                   | 富水区          | 0.0045               |
| 储卤层厚度 (m)   | 51      | 比弹性给水度            | 弱水区          | $1.5 \times 10^{-7}$ |
| 初始水头标高 (m)  | 1320    |                   | 富水区          | $1.6 \times 10^{-6}$ |
| 开始计算时间      | 1980年3月 | 已采资源量 ( $m^3$ )   | 318 183.98   |                      |
| 结束计算时间      | 1987年8月 | 剩余可采资源量 ( $m^3$ ) | 1 200 000    |                      |
| 计算时间步长 (d)  | 60      | 可采资源总量 ( $m^3$ )  | 1 518 183.98 |                      |
| 模拟计算次数      | 45      |                   |              |                      |

水井与虚设的抽水井均按定流量抽水进行计算, 并与模拟阶段相同的时间步长, 直到原抽水井的水位降低到储卤层的顶板为止, 此时其它虚设抽水井的水位也应几乎到达储卤层顶板。利用预报结束时得到的计算次数, 通过折算, 可以得到 $T_3x^6$ ; 储卤层的剩余可采资源量, 为 $1\ 200\ 000\text{m}^3$ , 加上自1980年3月至1987年8月已经开采卤水 $318\ 183.98\text{m}^3$ , 可得到 $T_3x^6$ ; 储卤层的可采资源量为 $1\ 518\ 183.98\text{m}^3$ , 计算结果见表1。

本文研究结果表明, 对那些进行过一定的勘探试验工作, 并积累了较多的卤水生产资料的储卤层, 用有限单元法评价卤水资源量是可行的, 其结果是令人满意的。值得注意的是, 由于深层储卤层的测压水头很高, 在实际计算中水位降深往往很大, 至使计算水头与实测水头不易拟合。此外, 在预报阶段的水位降深通常要大于在模拟阶段的水位降深, 所以计算结果的可靠性还有待于生产实践的进一步证实。

### 参 考 文 献

- [1] 地矿部水文地质工程地质研究所选编, 1982, 地下水资源评价理论与方法的研究(中国地质学会首届地下水资源评价学术会议论文选编)。地质出版社。
- [2] 杨立中、王大纯, 1989, 深层地下卤水资源量评价的研究。地质研究, 第2期。

## AN ATTEMPT TO EVALUATE RESOURCES OF DEEP-SEATED SUBSURFACE BRINES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Zhou Xun

(China University of Geosciences, Beijing)

### Abstract

The evaluation of groundwater resources of shallow aquifers using the finite element method is quite familiar to us. But so far, no perfect methods are available for estimating the resources of deep-seated subsurface brines. In this paper, a deep brine reservoir in a brine-bearing structure is formulated, the production of a brine well is simulated and predicted using the finite element method, and corresponding results are also given.

### 作 者 简 介

周训, 生于1963年4月, 1982年毕业于武汉地质学院, 1987年于中国地质大学(北京)获得硕士学位, 现为中国地质大学(北京)水文系讲师。通讯地址: 北京学院路29号, 邮政编码: 100083。