

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

含水层贮热能研究——上海贮能 试验数值模拟*

薛禹群 谢春红

(南京大学)

李勤奋

(上海市环境地质站)



本文提出了一个承压含水层的三维对流-热弥散模型。该模型的控制方程中不仅包含传统的对流和传导项,还有热弥散项,后者在许多著作中常被忽略掉。模型用来描述上海贮能试验场的一系列含水层贮能试验(单井灌水试验,对井灌水-回采试验,群井灌水-回采试验)。温度计算值和野外观测资料拟合得很好(相对误差 2.8—4.5%)。文中描述了使用的模型,并对温度分布的计算值和观测值进行详细比较。

一、绪 言

多孔介质中的热量输运与能源、环境密切相关,近十多年来吸引了各国不同领域的学者都来从事这一领域的研究。P. Heijde, Y. Bachmat 等 [1985] 提出了热量输运模型的详尽资料和研究现状,他们所能统计到的 21 个模型大多数是一维和二维的,只有二个模型和三维水流模型耦合,而且方程中只考虑了对流和热传导^[1]。

Auburn 大学于 1976、1979 年先后完成了二组野外试验,以后 S. S. Papadopoulos 和 S. P. Larson^[2] [1978], C. F. Tsang 等^[3] [1981] 和 J. F. Sykes 等^[4] [1982] 先后利用这批资料进行了数值模拟,模型都是二维轴对称的。

为了稳定地面沉降,使有限的地下水资源发挥更大的节能作用,上海市环境地质站和有关部门进行了含水层贮能试验。我们作了合理的假设后,提出了一个灌、抽水条件下更合理的三维对流-热弥散数学模型,方程的扩散项中考虑了热机械弥散,并用特征交替方向隐式差分法求解,求得在单井、对井、群井灌、抽水条件下的数值解,和实际贮能试验的资料拟合得很好。它再现了灌、抽水条件下地下水温度的变化过程,并为地下水温度变化趋势的预报,贮能效率的研究提供了可能性。

二、试验场水文地质条件

贮能试验场内有贮冷井 2 口,贮热井 2 口,观测孔 34 口,专门测温孔 4 口(图 1)。场区内地势平坦,全为第四系覆盖。其中全新统厚约 52m。自上而下依次为亚粘土,淤泥质亚粘土,粉砂(第一承压含水层)。晚更新统为亚粘土(中间夹一层细砂)及细砂、含砾中粗

* 本课题为部分国家自然科学基金资助项目。

本文 1987 年 2 月收到,1988 年 7 月改回,胡亚昌编辑。

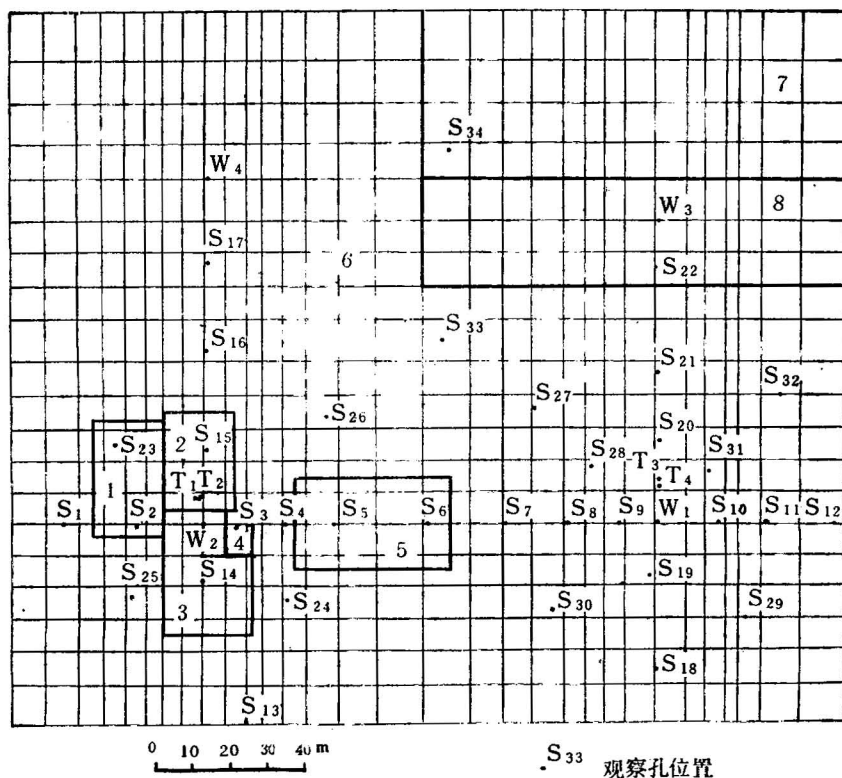


图 1 试验场井孔位置和网格剖分, 参数分区图

Fig. 1 The well layout, mesh and subregions for simulation at the test site

砂(第二承压含水层)和粘土(中夹 3m 粉砂层), 钻孔揭露厚度约 52m(图 2)。

贮能层为第二承压含水层, 顶面埋深 67—74m, 除 W1 井周围埋藏较深外, 一般变化不大; 底面埋深 91—95m, 起伏平缓, 厚约 19—26m。场及其附近地下水径流非常缓慢, 水力坡度仅 3.4×10^{-4} — 4.1×10^{-4} 。地下水位年变幅 6m 左右。水温的天然年变幅也

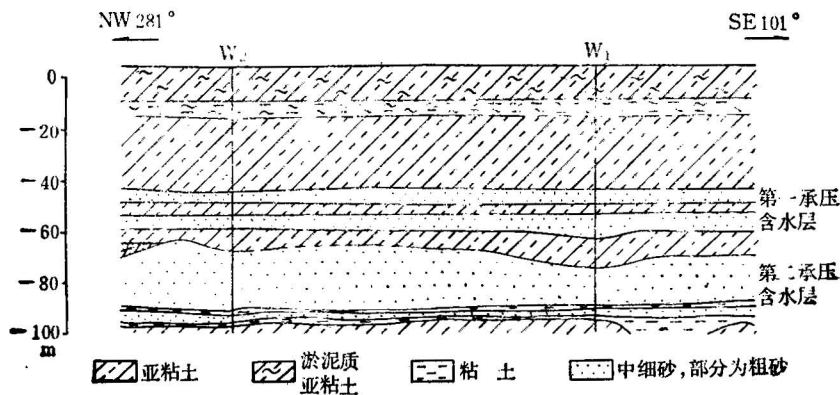


图 2 试验场地质剖面示意图

Fig. 2 Geological section of the test site

很小,垂向变化符合地热增温规律。含水层顶部水温 19.6—20.0℃ (平均 19.8℃),中部水温 20.2—20.5℃ (平均 20.4℃),底部水温 20.6—21.0℃ (平均 20.9℃)。埋深 65 m 以下地段的地温梯度平均值为 0.0451℃/m。

贮能含水层属各向同性非均质,所以介质的热参数也把它处理为各向同性非均质的。垂向上考虑到现有计算机容量,取其均值处理为均质的。含水层的顶、底板为有一定厚度的亚粘土,粘土,没有缺失的情况,故可视为与上、下含水层间没有越流的情况。由于含水层的顶底面除个别地段外起伏不大,天然水力坡度又极其平缓,所以把它概化为水平、等厚的含水层,天然流速忽略不计。由抽水或灌水所引起的流场内某一点的渗透速度根据 Darcy 定律设为

$$v = \frac{Q}{2\pi r M} \quad (1)$$

式中 v 为距灌,抽水井径向距离 r 处的渗透速度; Q 为灌水或抽水流量; M 为含水层厚度。

试验场先后进行了单井、对井和群井的冬灌冷水以夏用和夏灌热水以冬用的试验。单井冬灌时水的平均温度为 6.95℃;对井夏灌平均水温 29.22℃,夏用平均水温 15.59℃;群井夏灌、夏用平均水温分别为 28.78℃和 12.68℃。对它们分别进行了数值模拟。由于试验周期长达 46—88 天。不稳定流持续的时间和上述整个贮能过程相比是短暂的,所以可以近似地认为水流基本上是稳定的,均以上述速度运动,且除开采,回灌造成的流场外别无其他流场干扰。当灌(抽)水量改变,渗透速度也按(1)式作相应的改变。对井,群井试验时的流场根据 W_1 、 W_2 井(对井试验)或 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 井(群井试验)灌、抽水形成的由(1)式确定的渗透速度用合成法求得。

虽然贮能含水层延伸分布很远,但天然径流极其缓慢。因此,灌水或抽水的实际影响范围有限。根据水温观测资料,水温受灌(抽)水影响的范围就更小,在径向一般不超过 40—60m,在垂向也是如此,不超过 $\frac{3}{2}M$ 的地段。在此范围外,水温受天然动态控制,年变幅极小。根据这种情况,不难据此圈定计算区的范围,并可全部采用一类边界,在计算过程中保持水温不变,在垂向上还要符合当地地温梯度 1℃/24m。

三、数学模型和数值方法

根据热量平衡原理,考虑由于: (1)对流作用,通过液相流动输运热量;(2)传导作用,通过液相和固相扩散输运热量;(3)类似于物质输运问题中的机械弥散,多孔介质中各点的局部流速分布不均所引起的热量输运,我们称为热的机械弥散现象;不难导出下列热动平衡方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - \frac{C_w}{C} \operatorname{div}(T \vec{v}) \quad (2)$$

式中 T 为温度, C 和 C_w 分别为多孔介质的热容量和水的热容量, $\vec{v}$ 为地下水的渗透速度, λ 为热动力弥散系数

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_v \quad (3)$$

λ_c 为多孔介质的热传导系数, λ_{ec} 为热机械弥散系数。

如令

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{C_w}{C} \vec{v}$$

式中 $\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$, $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 、 $\vec{k}$ 分别为 x 轴, y 轴, z 轴的正向单位矢量。同时采用 Lagrange 坐标系, 即运动坐标系, 速度为 $\frac{d\vec{r}}{dt}$, 则(2)式可改写为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - \frac{C_w}{C} T \operatorname{div} \vec{v} \quad (4)$$

在无源、汇处和稳定流条件下, $\operatorname{div} \vec{v} = 0$, 则有

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) \quad (5)$$

有关方程的推导和下面将要谈到的数值法^[5,6]将另文介绍。

对于上海贮能试验场这一具体情况, 如坐标原点放在贮能含水层的中部, 则 $|z| \leq \frac{M}{2}$

的区域为贮能含水层, $|z| > \frac{M}{2}$ 的部分为非贮能层, 有

$$C = \begin{cases} C_a \\ C_c \end{cases} \quad \lambda = \begin{cases} \lambda_a = \lambda_{ea} + \lambda_{ea} \\ \lambda_c = \lambda_{cc} \end{cases} \quad \begin{matrix} |z| \leq \frac{M}{2} \\ |z| > \frac{M}{2} \end{matrix}$$

$$T = \begin{cases} T_a \\ T_c \end{cases}, \quad \vec{v} = \begin{cases} \vec{v}_c \\ 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} |z| \leq \frac{M}{2} \\ |z| > \frac{M}{2} \end{matrix}$$

式中 C_a 、 C_c 分别为贮能含水层和非贮能层的热容量, λ_{ea} 、 λ_{cc} 分别为上述两者的热传导系数, λ_{ea} 为贮能含水层的热机械弥散系数, T_a 、 T_c 分别为两者的温度, $\vec{v}_a$ 为贮能含水层中的渗透速度。由此得该贮能试验场的数学模型为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) \quad (x, y) \in F, -\frac{3}{2}M \leq z \leq \frac{3}{2}M \quad (6)$$

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z) \quad (x, y) \in F, -\frac{3}{2}M \leq z \leq \frac{3}{2}M \quad (7)$$

$$T|_{\Gamma} = \varphi(x, y, z) \quad (x, y) \in \Gamma, -\frac{3}{2}M \leq z \leq \frac{3}{2}M \quad (8)$$

$$T\left(x, y, \frac{3}{2}M, t\right) = T_1(x, y) \quad (x, y) \in F \quad (9)$$

$$T\left(x, y, -\frac{3}{2}M, t\right) = T_2(x, y) \quad (x, y) \in F \quad (10)$$

$$T|_{w_i} = \phi_i(z, t) = \begin{cases} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \end{cases} \quad \begin{matrix} |z| \leq \frac{M}{2} \\ \frac{3}{2}M > |z| > \frac{M}{2} \end{matrix} \quad W_i \in F, \quad (11)$$

式中 F 为计算域, Γ 为 F 的边界, φ 、 T_1 、 T_2 为已知函数, T_0 为天然动态下的地温, W_i 为第 i 口灌水井的井壁, ϕ_i 为灌水井的井壁温度, ϕ_{i1} 为灌水井灌入水的温度, ϕ_{i2} 为非贮能层部分的温度。

解上述定解问题采用特征交替方向隐式差分法。为减少存贮量, 加快运算速度, 对(6)式右端的处理系用传统的 ADI 法。左端则沿特征线方向进行差分, 以防止数值弥散。若以 $x_i(n\Delta t)$, $y_j(n\Delta t)$, $z_k(n\Delta t)$ 代表结点 $p(x_i, y_j, z_k)$ 在 $t = n\Delta t$ 时的位置, 记为 ${}^n\tilde{r}_p$; $x_i\left\{\left(n + \frac{1}{3}\right)\Delta t\right\}$, $y_j\left\{\left(n + \frac{1}{3}\right)\Delta t\right\}$, $z_k\left\{\left(n + \frac{1}{3}\right)\Delta t\right\}$ 为结点 $p(x_i, y_j, z_k)$ 在 $t = \left(n + \frac{1}{3}\right)\Delta t$ 时的位置, 记为 ${}^{n+\frac{1}{3}}\tilde{r}_p$ 。若 ${}^{n+\frac{1}{3}}\tilde{r}_p$ 的坐标就是 (x_i, y_j, z_k) , 则 ${}^n\tilde{r}_p$ 的位置可由下式确定

$${}^n\tilde{r}_p = {}^{n+\frac{1}{3}}\tilde{r}_p - \int_{t_n}^{t_n+\frac{1}{3}\Delta t} \frac{C_w}{C} \vec{v} dt$$

式中 $t_n = n\Delta t$, 此时 $[x_i(n\Delta t), y_j(n\Delta t), z_k(n\Delta t)]$ 的温度 $T_{i,j,k}$ 是已知的, 但 ${}^n\tilde{r}_p$ 不一定恰好落在结点上, 这时 $T({}^n\tilde{r}_p)$ 的温度用周围结点在 $t = n\Delta t$ 时的温度插值求得。于是 $T_{i,j,k}^* = T({}^n\tilde{r}_p, t_n)$ 。把它代入与(6)式相应的差分方程的左端, 即可求得下一时刻的温度 $T_{i,j,k}^{n+\frac{1}{3}}$ 。

若 ${}^n\tilde{r}_p$ 的位置就是结点 $p(x_i, y_j, z_i)$, 则 ${}^{n+\frac{1}{3}}\tilde{r}_p$ 的位置由下式确定

$${}^{n+\frac{1}{3}}\tilde{r}_p = {}^n\tilde{r}_p + \int_{t_n}^{t_n+\frac{1}{3}\Delta t} \frac{C_w}{C} \vec{v} dt$$

由于 $t = n\Delta t$ 时 T 在结点 p 的值是已知的, 利用与(6)式相应的差分格式可求得

$$T\left[{}^{n+\frac{1}{3}}\tilde{r}_p, \left(n + \frac{1}{3}\right)\Delta t\right].$$

有关所用数值法的详情和评述请参阅参考文献[7]。

四、数值模拟

根据试验时实测到的热量影响范围, 选择一个比上述范围大一点的区域作为计算区, 以便提供一个温度不变的边界。如在平面上对井试验和群井试验的计算区分别为 $124 \times 250\text{m}^2$ 和 $216 \times 250\text{m}^2$ 的矩形, 在垂向上计算范围均为埋深 50—110m, 包括了贮能含水层和上、下非贮能层。

考虑到热量输运特征, 在 x - y 平面上采用不等距网格。在热量影响范围内, 网格随距贮冷、贮热井距离的增大而减小, 以适应灌入水在相同时间内随径向距离的增大移动距离逐渐减小的情况(如灌水流量不变)。在这个影响范围以外, 网格增大。总的情况是 x 轴方向的网格距为 4.5—14m, y 轴方向为 4.5—13m。两个方向网格距略有不同是由于考虑具体观测孔位置的结果(图1)。在 z 方向也采用不等距网格, 贮能含水层内为 5m, 非贮能层内为 10m(图3)。上述网格距是经试算确定的。试算时的最小网格距为 1.5—3m。为了便于比较, 对井、群井试验的剖分是一致的, 结点总数分别为 3744 和 6048 个。时间步长为 1 天, 步长总数对井、群井试验依次为 63 和 46。

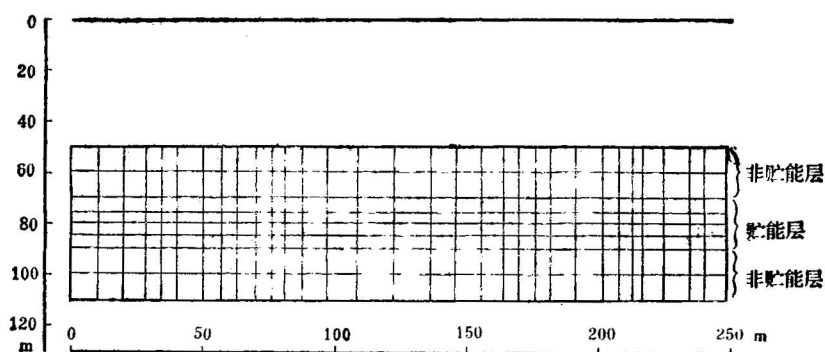


图 3 垂向网格剖分图

Fig. 3 A cross section of the mesh used in simulation

所有数十个观测孔全部作为比较点,并对整个试验期的各个观测时刻都进行拟合比较,取相应时刻的实测温度作为比较温度,以考核模型的适应性。

根据介质的非均质性,在平面上分为八个区(对井时为六个),垂向上分为上、下非贮能层和贮能层三个区。前者的热参数直接采用取样后在实验室测定的数据,如表所示:

表 1

	热传导系数 λ_e $J/(m \cdot d \cdot ^\circ C)$	热容量 C_e $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$
上非贮能层	141112.6	2510400
下非贮能层	184030.5	2092000

贮能含水层的热参数考虑到它的特性和取样测定的困难(难以保持原状土和原始水流状态),没有采用取样后在实验室测定的数据,改用由实际观测资料反求。目标函数 f 采用

$$f = \sum_{i=1}^I \eta_i \Delta s_i$$

式中 Δs_i 为观测孔 i 各个时刻温度计算值和观测值间误差绝对值的平均值; η_i 为观测孔 i 的加权系数, $0 \leq \eta_i \leq 1$, 决定于离灌(抽)水井的距离,离得越近,取值越大; I 为观测孔总数。采用试估-校正法和单纯形法优选参数。根据(2)或(6)式的性质和反求参数方法解是不唯一的情况,显然没有必要同时对 λ 和 C 按分区数取值优选。因此,在适当选择后,决定对贮能层的热动力弥散系数 λ_e 只取一个值,热容量 C 则按分区数取值进行优选。

根据群井试验资料求得的 λ_e 为 $2845120 J/(m \cdot d \cdot ^\circ C)$, C_e 则如表 2 所示,

表 2

分区号	1	2	3	4	5	6	7	8
热容量 C_e $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$	4602400	2092000	1004160	836800	2928800	3891120	5020800	6276000

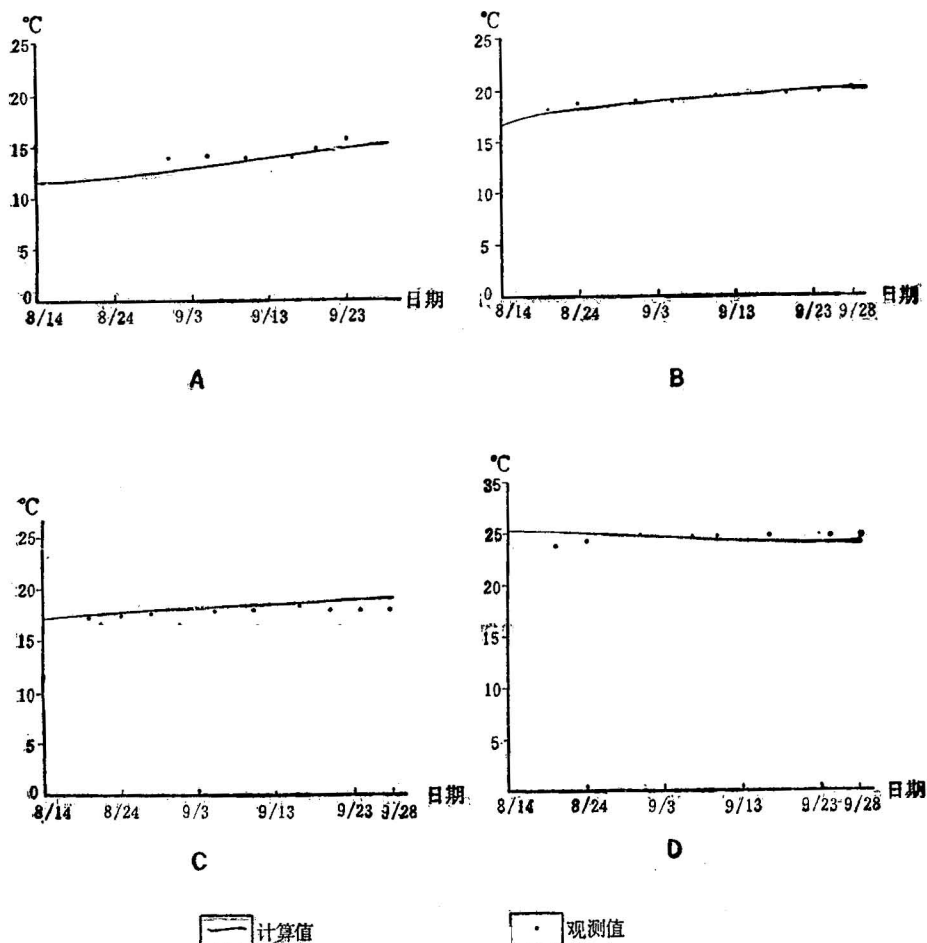


图4 群井试验不同深度温度的计算值和观测值

Fig. 4 The simulated and observed temperatures at different depths in multiwell experiment
A——S10 孔, 85m 深处; B——S7 孔, 85m 深处; C——S18 孔, 75m 深处; D——S2 孔, 80m 深处。

A——well S10, temperature at 85m depth; B——well S7, temperature at 85m depth; C——well S18, temperature at 75m depth; D——well S2, temperature at 80m depth.

水的热容量取值 $4184 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

为了检验模型和参数的可靠性、适用性, 我们把 48 天群井试验资料反求得的上述参数原封不动地用于 63 天的对井试验, 证实这组参数能外推出对井试验的观测结果, 所有观测孔 (25 个), 所有观测时段 (63) 计算值和观测值误差绝对值的均值不超过 0.69°C 。说明求得的参数和模型是可靠的, 具有实用性。

从求得的参数可以看出: (1) 贮能层的 $\frac{\lambda_a}{C_a}$ ($0.453 \sim 3.4 \text{ m}^2/\text{d}$) 比相邻非贮能层的 $\frac{\lambda_c}{C_c}$ ($0.055 \sim 0.088 \text{ m}^2/\text{d}$) 大得多。说明求得的参数符合客观规律是正确的。因为 $\lambda^* = \lambda_a + \lambda_{v,s}$, 非贮能层的 $\lambda_{v,s} = 0$, 故 λ_a 比 λ^* 大得多, 反映出热机械弥散项 λ_a 的作用; (2) 灌水

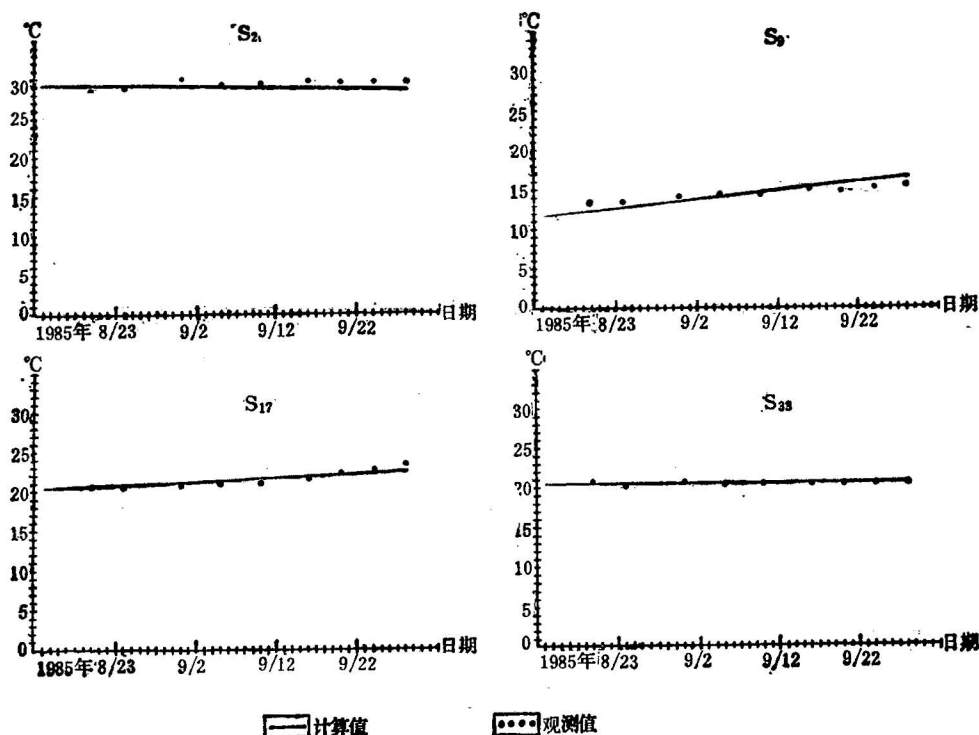


图 5 群井试验时温度的计算值和观测值(贮能层垂向温度平均值)

Fig. 5 The simulated and observed temperatures in multiwell experiment (average value of the temperatures at different depths in the aquifer)

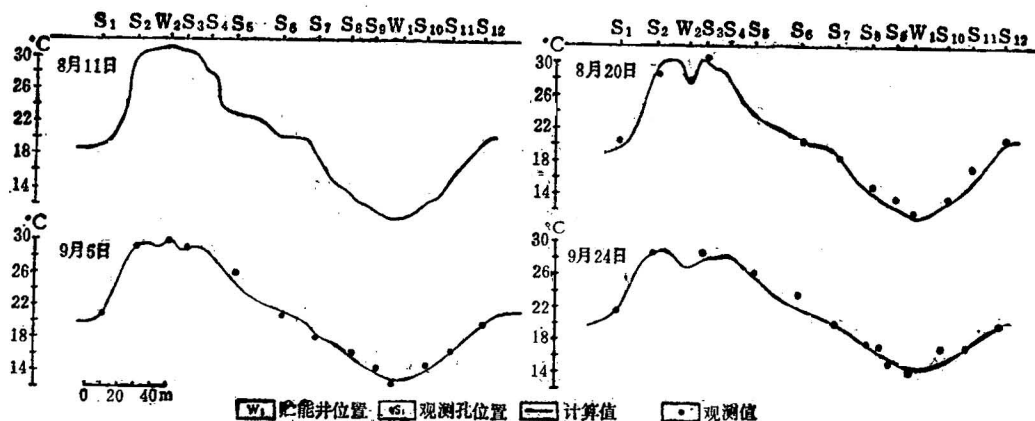


图 6 群井试验时沿 W1-W2 线贮能层平均温度曲线

Fig. 6 Average temperatures in the aquifer along line W1-W2 in multiwell experiment

井附近 $\frac{\lambda_a}{C_a}$ 值大 (1.36—3.4 m²/d), 远离井则 $\frac{\lambda_a}{C_a}$ 值小 (0.68—0.97 m²/d), 反映了井附近流速大, λ_a 大的客观规律。

虽然对单井、对井、群井试验的结果,我们都进行了数值模拟,限于篇幅,只能重点介

表 3 温度计算值和观测值误差绝对值统计表

Table 3 statistics of absolute errors of calculated and observed temperatures

单井试验 Single well test

孔号	S ₇	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₁	T ₃
误差绝对值的均值℃	0.29	0.44	0.41	0.93	0.09	0.28	0.99	0.38	0.48

总平均=0.47℃

对井试验 Paired well test

孔号	W ₁	S ₂	S ₃	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₈
误差绝对值的均值℃	0.82	0.79	0.59	0.56	0.51	0.75	0.88	0.74	0.47	0.77	0.66	1.01	0.34
孔号	S ₁₉	S ₂₀	S ₂₁	S ₂₃	S ₂₄	S ₂₅	S ₂₈	S ₂₉	S ₃₀	S ₃₁	T ₁	T ₃	
误差绝对值的均值℃	0.82	0.42	0.49	0.55	1.03	0.46	0.96	0.45	0.45	0.55	0.80	0.67	

总平均=0.69℃

群井试验 Multiwell test

孔号	S ₁	S ₂	S ₃	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂
误差绝对值的均值℃	0.58	0.77	1.11	1.19	0.66	0.10	0.29	0.59	0.77	0.52	0.24
孔号	S ₁₄	S ₁₅	S ₁₇	S ₁₈	S ₁₉	S ₂₀	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₃	S ₂₄	S ₂₅
误差绝对值的均值℃	0.89	0.88	0.30	0.27	0.37	0.45	0.36	1.08	0.58	0.38	0.38
孔号	S ₂₇	S ₂₈	S ₂₉	S ₃₀	S ₃₁	S ₃₃	S ₃₄	T ₁	T ₃	W ₁	W ₃
误差绝对值的均值℃	0.26	0.34	0.18	0.32	0.38	0.08	0.10	0.90	0.75	0.60	0.59

总平均=0.43℃

绍群井试验数值模拟的结果。部分观测孔计算值和观测值的比较曲线列于图 4、5, 显示两者基本是一致的。离灌水井近的观测孔温度变化大, 误差也小些。图 6 显示不同时期沿 W₁—W₃ 线温度随距离变化时, 计算值和观测值的对比情况, 两者也基本一致。为了便于了解全貌在表 3 中列出了单井、对井和群井试验数值模拟时所有观测孔, 所有计算时段计算值和观测值误差绝对值的平均值。

五、模拟结果分析

1. 数值模拟再现了 1984、1985 年 88、63、46 天单井、对井、群井试验的全过程, 有冬灌、夏灌夏用等多种情况, 用群井试验观测资料求出的参数能外推出对井试验的观测结果, 说明参数的任意性较小, 所建模型可靠, 适用范围比较大。

2. 误差绝对值的均值单井、群井试验分别为 0.47°C 和 0.43°C 。利用群井试验所得参数外推对井试验结果时误差绝对值的均值为 0.69°C 。但所使用的测温仪器的精度也只有 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。列次试验时最高和最低温度之差超过 15°C ，相对误差只有 $0.28\sim 4.5\%$ 。各种图形拟合也比较好。

3. 求得的参数中贮能层的 $\frac{\lambda_a}{C_a}$ 比非贮能层的 $\frac{\lambda_a}{C_a}$ 大得多；灌水井附近的 $\frac{\lambda_a}{C_a}$ 又比远离井的 $\frac{\lambda_a}{C_a}$ 大，如前述是符合客观规律的。优选求得的贮能层热容量 C_a 比取样后在实验室测定的数据 $1784894.4\sim 2178608.8\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 大，也符合实际，因为实验室测定时无法考虑水流速度的影响。

4. 无论单井、对井、群井试验水温垂向剖面图计算值和观测值都比较一致，无明显数值弥散。它们还清楚地显示出灌、抽水条件下贮能层内热量的输运情况。以群井试验为例(图7)，热水自灌水井 W_2 、 W_4 不断向外运移，但在井两侧明显地不对称，而且越来越明显。这是因为 W_2 、 W_4 井形成的流场受抽水井 W_1 、 W_3 所形成流场的影响，使热水体在 W_2-W_1 、 W_4-W_3 方向明显地偏向 W_1 、 W_3 井，该侧热锋面的运移速度远快于另一侧。平面图(图8)上的温度等值线也显示出上述特征。灌水井周围的热水体受抽水影响锋面成舌状向抽水井延伸。但 W_4 、 W_3 的夏灌夏用开始得比 W_2 、 W_1 井晚 42—46 天，夏灌夏用量也比 W_2 、 W_1 井小得多，所以热水体小，舌状体也不明显。另一方面在图

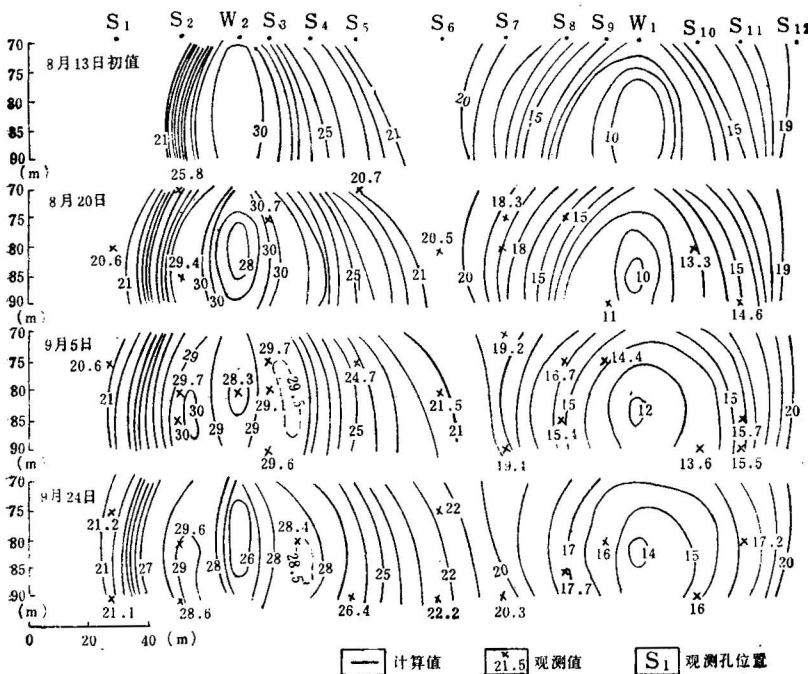


图7 沿 W_1-W_2 线垂向剖面上的温度曲线(群井试验)

Fig. 7 The simulated temperature contour and the observed temperatures along the W_1-W_2 cross section in multiwell experiment

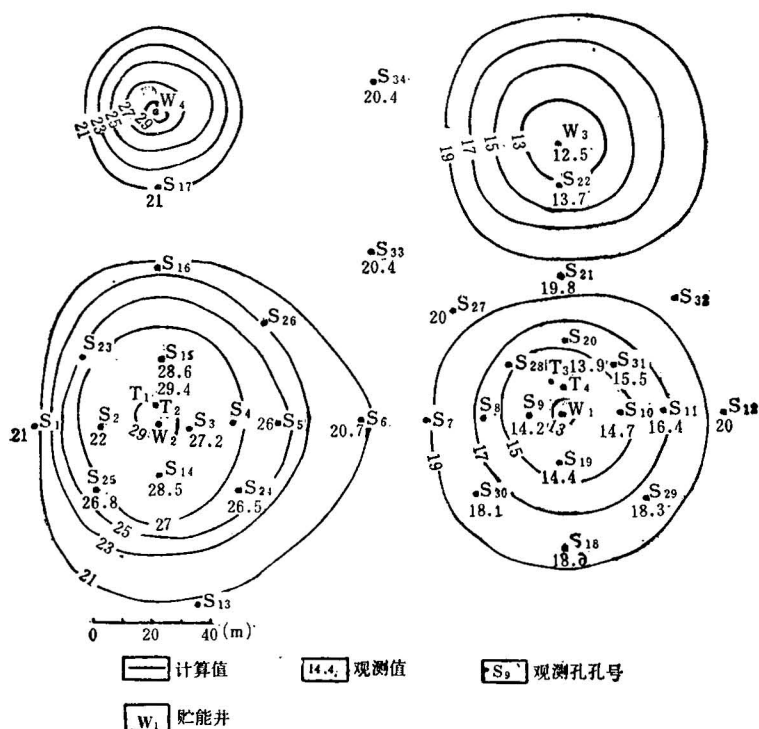


图 8 群井试验贮能层内温度分布曲线

1985 年 9 月 5 日

Fig. 8 Temperature distribution in the energy-storing aquifer in multiwell experiment on September 5, 1985

上还可看出在 W_2-W_4 和 W_1-W_3 方向上由于不同流场的叠加, 热量输运变慢了。随着冷水不断被抽走和‘热’锋面的推进, W_1 、 W_3 井周围冬灌贮存的水体逐渐缩小, 到夏用期末, 曲线显示低于 14°C 的水基本上都抽走了(图 7、8)。

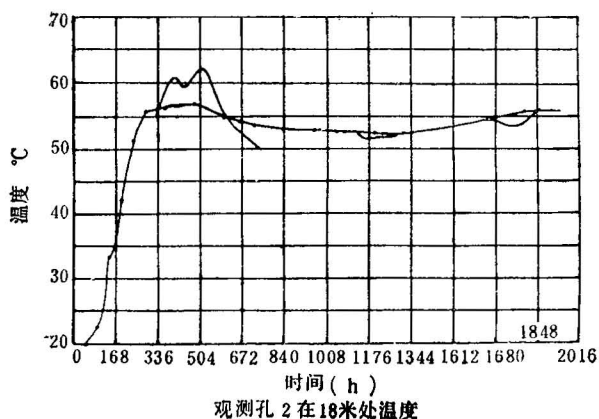


图 9 加州大学伯克利分校的一个算例(据 C. F. Tsang, T. Buscheck 等)

Fig. 9 An example of, the University of California, Berkeley (from C. F. Tsang, T. Buscheck and C. Doughty)

垂向剖面还显示出: 由于温差小因热水比重小, 冷水比重大而造成的垂向流动在这里不明显, 和实测垂向剖面一致。所以建立模型时忽略此点是允许的。

5. 国外类似的算例其模拟结果列于图 9, 可靠比较。

通过上述分析, 不难得出结论: 上述结果是可靠的, 质量比较高。

六、结 论

通过前面的分析, 可以得出下列结论:

1. 所建立的三维温度场模型是合理的, 不仅再现了试验期地下水的温度动态, 还能反映灌、抽水条件下, 储能期、开采期储能层中热量输运和温度变化规律, 结果令人满意。因此, 它能为采、灌过程中冷、热水运移, 分布, 储能效率的预测提供科学依据, 为贮冷井、贮热井合理井距的确定, 为贮能对环境影响的评价提供新的手段。

2. 控制方程中考虑由于热动力弥散作用, 通过液相输运热量是必要的, 如一般文献那样^[1,8], 只考虑对流和热传导是不充分的。

3. 对流-弥散的热量输运问题可以通过控制方程的 Lagrange 形式用特征交替方向隐式差分法来求解。当 Peclet 数不大时无明显数值散和震荡, 且可减少存贮量, 提高运算速度。这种方法适用性广, 对一般热量输运和溶质运移问题也是适用的。

参 考 文 献

- [1] Heijde, Paul V. D., Bachmat, Y. et al., 1985, Groundwater management: the use of numerical models, second edition, American Geop. Union.
- [2] Papadopoulos, S. S., and Larson, S. P., 1978, Aquifer storage of heated water: part 2-Numerical simulation of field results, Groundwater, vol. 16, No. 4, pp. 242—248.
- [3] Tsang, C. F., Buscheck, T., and Doughty, C., 1981, Aquifer thermal energy storage: a numerical simulation of Auburn University field experiments, Water Resources Research, vol. 17, No. 3, pp. 647—658.
- [4] Sykes, I. S., Lantz, R. B., Pahwa, S. B., and Ward, D. S., 1982, Numerical simulation of thermal storage experiment conducted by Auburn University, Groundwater, vol. 20, No. 5, pp. 569—576.
- [5] 薛禹群、谢春红, 1980, 水文地质学的数值法, 煤炭工业出版社。
- [6] Neuman, S. P., 1984, Adaptive Eulerian-Lagrangian finite element method for advection-dispersion, Intern. J. for Numer. Methods in Engin., vol. 20, pp. 321—337.
- [7] Xue, Yuqun and Xie, Chunhong, 1988, A characteristic alternating direction implicit scheme for the advection-dispersion equation, Proceedings of the VII Intern. Conf. on Computational Methods in Water Res., MIT, USA, Developments in Water Sciences, No. 36, pp. 63—68.
- [8] Gringarten, A. C. and Sauty, J. P., 1975, A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow, J. Geophys. Res., vol. 80, No. 35, pp. 4956—4962.

AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE: A NUMERICAL SIMULATION OF SHANGHAI THERMAL STORAGE EXPERIMENTS

Xue Yuqun,

(Dept. of Geology, Nanjing University)

Xie Chunhong

(Dept. of Mathematics, Nanjing University)

Li Qinfen

(Shanghai Environmental Geology Centre)

Abstract

A three-dimensional convection-heat dispersion model for a confined aquifer is developed. The governing equation of the model contains not only the convection and conduction terms that were usually considered, but also the heat dispersion term that was generally neglected in many papers. This model is used for describing a series of seasonal aquifer thermal energy storage tests made at the Shanghai site including the injection test in a single well, the injection-production test in paired wells and the injection-production test in a group of wells. The simulated temperatures agree very well with the field data (relative errors being 2.8—4.5%). A general description of the 3-D numerical model used is given, which is followed by a detailed comparison of simulated and observed temperature distributions.

作者简介

薛禹群, 1931 年生。1952 年毕业于唐山交通大学。长期在南京大学地球科学(地质)系从事水文地质的教学和科研。现任南京大学教授。