

佳木斯市地下水水量水质模型*

朱学愚 孙克让

(南京大学地球科学系 南京 210008)

提要 佳木斯市是一个以开采地下水为主要供水水源的城市。本文根据当地的水文地质条件,建立了佳木斯市的地下水的水量水质模型。用有限元法求解水量模型进行地下水资源评价。用特征有限元法求解水质模型进行地下水污染预测,该方法在求解对流-弥散方程时能有效地消除数值弥散和数值振荡,精度较高。为使该方法付诸实施,文中也提出了当利用特征有限元法求解时确定运动水质点所属单元的方法。

关键词 地下水资源 水资源评价 对流-弥散方程 特征有限元法 地下水污染预测

分类号 S 273.4; O 242.1

1 模拟区的水文地质条件概化

1.1 水文地质条件

佳木斯市地处松花江下游南岸,是黑龙江省东北部的一个工业城市,属寒温带大陆性气候,多年平均降水量为 540.5 mm,降水多集中在 6~8 月,每年 11 月至次年 4 月中旬为结冻期。研究区的北西部为松花江,江水和地下水有密切的水力联系。南部为基岩山区,有二条松花江的支流——英格吐河和音达木河由南而北穿过研究区。二条支流大量接纳工业和生活污水,水质已严重污染。

佳木斯市的开采含水层为第四系的潜水含水层的冲积砂砾、卵石层。在北部沿江一带,含水层的厚度达 80m,渗透系数 K 约为 80m/d,单井涌水量大于 $5000\text{m}^3/\text{d}$ 。向南含水层变薄,颗粒变细,富水性变差。地下水主要补给来源为:降水入渗,地表水的补给,灌溉水的回渗和南部山区地下水的流入。

1.2 水文地质模型

地下水是佳木斯城市生活用水和工业供水的主要水源,因此,地下水水量的多寡和水质的好坏,直接影响到城市的发展。本文用建立和求解水量模型和水质模型的方法,对佳木斯的地下水水资源和环境进行研究。

根据水文地质条件,研究区的地下水运动可概化为非均质各向同性孔隙含水层的非稳定流动,水流符合达西定律。污染物在含水层中的运移,可简化和概化为多孔介质中溶质的对流-弥散运移,满足对流-弥散方程。

本文于 1993 年 2 月 16 日收到, 1993 年 6 月 14 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助的课题。

2 模拟预测模型

在水文地质模型的基础上, 建立了相应的数学模型。水流问题的数学模型^[1]如下:

$$(a) \begin{cases} \mu \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot [K(H-Z) \nabla H] + R - \sum_{j=1}^m Q_j \delta(x-x_j, y-y_j) & (x, y) \in \Omega & (1) \\ H(x, y, 0) = H_0(x, y) & (x, y) \in \Omega & (2) \\ H(x, y, t) = H_1(x, y, t) & (x, y) \in \Gamma_1 & (3) \\ T \frac{\partial H}{\partial n} = q & (x, y) \in \Gamma_2 & (4) \end{cases}$$

而地下水中的污染质运移的数学模型为上述的水流数学模型(a)和下面的污染质运移的数学模型(B)耦合而成。

$$(b) \begin{cases} R_d \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C - uC) + \frac{C'w}{H-Z} - \sum_{j=1}^m \frac{CQ_j}{\theta(H-Z)} \delta(x-x_j, y-y_j) & (x, y) \in \Omega & (5) \\ C(x, y, 0) = C_0(x, y) & (x, y) \in \Omega & (6) \\ C(x, y, t) = C_1(x, y, t) & (x, y) \in \Gamma_1 & (7) \\ \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} - u_x C \right) n_x + \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} - u_y C \right) n_y = \frac{C^* q}{\theta(H-Z)} & (x, y) \in \Gamma_2 & (8) \end{cases}$$

式中 H 为地下水水头, (m); μ 为给水度, 无量纲; K 为渗透系数 (m/d); Z 为含水层底板标高 (m); ∇ 为梯度算子; R 为垂向补给量 (或排泄量) (m/d), 其值为 $R = \alpha p + \beta I - \varepsilon$; α 为降水入渗补给系数, 无量纲; p 为单位时间的降水量 (m/d); β 为灌溉入渗补给系数, 无量纲; I 为面平均的灌溉量 (m/d); ε 为潜水蒸发强度 (m/d); $\delta(x-x_j, y-y_j)$ 为二维的 Dirac Delta 函数; Ω 为计算区域; Γ_1 为计算区域的第一类边界; Γ_2 为计算区域的第二类边界; $H_0(x, y)$ 为初始水头 (m); $H_1(x, y, t)$ 为第一类边界上的水头 (m); q 为第二类边界上的单位法向流量 (m²/d); n 为第二类边界的外法线方向, $n_x = \cos(n, x)$, $n_y = \cos(n, y)$; C 为污染物的浓度 (g/L 或 kg/m³); R_d 为阻滞因子, 无量纲; D 为水动力弥散张量 (m²/d), 在二维情况下 4

个分量为 $D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$; $u = \frac{v}{\theta}$ 为平均流速矢量 (m/d), 其 2 个分量为 u_x, u_y ; v 为渗透速度矢量 (m/d); θ 为有效孔隙度, 无量纲; w 为污染源补给地下水的强度 (m/d); C' 为污染源的浓度 (kg/m³); Q_j 为 j 号井的抽水量 (m³/d); C_0 为初始浓度 (kg/m³); C_1 为第一类边界上的已知浓度 (kg/m³); C^* 为第二类边界上的流入浓度 (kg/m³)。

3 模型的求解

数学模型(a)可用有限元法求解。但当用有限元法解数学模型(b)时, 不可避免地要产生数值弥散和波动现象。本文采用特征有限元法这一近代的数值方法, 有效地解决了用有限元

法解对流为主的溶质运移方程时无法克服的浓度出现负值(或超过最大值)和数值波动问题,从而提高了数值预报的精度。

3.1 用有限元法解水流方程

对于数学模型(a),可用三角形单元、线性插值的有限元法求解。如果时间取全隐式差分,则得线性代数方程组如下:

$$([N] + [M]\Delta t)\{H^{k+1}\} = [N]\{H^k\} + [P]\Delta t + [F]\Delta t + [Q]\Delta t \quad (9)$$

式中 $[N]$ 为给水度矩阵; $[M]$ 为渗透矩阵; Δt 为时间步长,取为一个月; $\{H^{k+1}\}$ 为未知水头列向量; $\{H^k\}$ 为已知水头列向量; $[P]$ 为垂向补给列向量; $[Q]$ 为水井抽水列向量; $[F]$ 为边界条件引起的已知项列向量。

解线性方程组(9),即可得各计算点的水头值。

3.2 用特征有限元法解对流—弥散方程

当求解数学模型(b)时,必须已知地下水的实际平均速度 u 及其分量 u_x 和 u_y 。

3.2.1 用伽辽金有限元法计算渗透速度

计算渗透速度时,通常首先解数学模型(a),求出水头分布,然后再对水头求导,算出渗透速度的近似值。但该方法的误差较大。我们采用伽辽金有限元法直接计算渗透速度,即令

$$\int_D \left(v_s + K_s \frac{\partial H}{\partial x} \right) N_i dA = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (10)$$

对 v_s 进行线性插值

$$v_s = \sum_{j=1}^n N_j v_{sj} \quad (11)$$

得

$$[S]\{V_s\} = \{F\} \quad (12)$$

矩阵元素表达式为

$$s_{ij} = \int_D N_i N_j dA \quad (13)$$

$$f_i = - \int_D N_i K_s \frac{\partial H}{\partial x} dA \quad (14)$$

v_y 也可用该法求出,这种方法可解决速度场不连续问题。

3.2.2 用特征有限元法解数学模型(b)

该方法的原理是把对污染物运移的贡献分解为对流贡献和弥散贡献。用特征线法求对流贡献,用有限元法求弥散贡献^[3]。用该法时,即使是对流占优势的问题,数值弥散和数值振荡也很小^[4]。如果将方程式(5)写成水动力导数的形式,则有

$$R_s \frac{dC}{dt} = \nabla(D\nabla C) - fC + \overline{W} - \sum_{j=1}^m \frac{CQ_j}{\theta(H-Z)} \delta(x-x_j, y-y_j) \quad (15)$$

式中的水动力导数为

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{u}{R_s} \nabla C \quad (16)$$

$$\text{而} \quad f = \nabla \cdot u \quad (17)$$

$$\overline{W} = \frac{C'w}{H-Z} \quad (18)$$

经推导, 得到二维问题的特征有限元的表达式^[2]

$$\begin{aligned} C_i^{k+1} &= \sum_{e=1}^n \frac{1}{3} A^e R_i^e + \Delta t \sum_{e=1}^n [(D_{i,i}^e + F_{i,i}^e) C_i^{k+1} + (D_{i,j}^e + F_{i,j}^e) C_j^{k+1} + (D_{i,m}^e + F_{i,m}^e) C_m^{k+1}] \\ &= \sum_{e=1}^n \frac{1}{3} A^e \overline{W}_i^e \Delta t + K_{oi} \sum_{e=1}^n \frac{1}{3} A^e R_i^e \end{aligned} \quad (19)$$

上式是解对流为主及一般的弥散问题的有效格式。式中

Δt 为时间步长; i, j, m 为三角形单元 e 的三个节点; A^e 为单元 e 的面积; $C_i^{k+1}, C_j^{k+1}, C_m^{k+1}$ 分别为 $k+1$ 时刻位于节点 i, j, m 上的运动水质点的污染物浓度; K_{oi} 为 $k+1$ 时刻位于节点 i 上的运动水质点在 k 时刻的浓度, 有

$$K_{oi} = N_i(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) C_i^k + N_j(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) C_j^k + N_m(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) C_m^k \quad (20)$$

式中 N_i, N_j, N_m 为单元基函数; C_i^k, C_j^k, C_m^k 为 k 时刻单元 e 的节点 i, j, m 上的污染物浓度; $\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k$ 为 $k+1$ 时刻位于 i 节点的运动水质点 k 时刻的位置, 它正好位于单元 e 中, 可用单步反向追踪法求出, 表达式为

$$\bar{x}_i^k = x_i^{k+1} - \int_{t_k}^{t_{k+1}} u_x^* dt \quad (21)$$

$$\bar{y}_i^k = y_i^{k+1} - \int_{t_k}^{t_{k+1}} u_y^* dt \quad (22)$$

而

$$u_x^* = \frac{u_x}{R_e}, \quad u_y^* = \frac{u_y}{R_e} \quad (23)$$

此外

$$D_{i,i}^e = \frac{D}{4A^e} (b_i b_i + c_i c_i) \quad (24)$$

$$D_{i,j}^e = \frac{D}{4A^e} (b_i b_j + c_i c_j) \quad (25)$$

$$D_{i,m}^e = \frac{D}{4A^e} (b_i b_m + c_i c_m) \quad (26)$$

$$b_i = y_j - y_m, \quad b_j = y_m - y_i, \quad b_m = y_i - y_j \quad (27)$$

$$c_i = x_m - x_j, \quad c_j = x_i - x_m, \quad c_m = x_j - x_i \quad (28)$$

$$F_{i,i} = \frac{1}{6} f A^e C_i \quad (29)$$

$$F_{i,j} = \frac{1}{12} f A^e C_j \quad (30)$$

$$F_{im} = \frac{1}{12} f A^e C_m \quad (31)$$

把特征有限元法投入实际应用中的一个关键性问题是确定运动水质点在 k 时刻的位置 $(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k)$ 所在的单元号, 否则就无法应用 (20) 式计算 K_{ei} 。我们建议在计算程序中用下式进行判别: 如果水质点位于单元 e (顶点为 i, j, m) 中, 则有

$$N_i(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) + N_j(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) + N_m(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) = 1 \quad (32)$$

否则

$$N_i(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) + N_j(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) + N_m(\bar{x}_i^k, \bar{y}_i^k) \neq 1 \quad (33)$$

这一方法简便有效, 在程序中很易处理。

4 参数识别

4.1 水位拟合

根据抽水试验测定的水文地质参数, 作为初值, 并给出其变化的上、下界, 代入 (9) 式计算水头, 并且和 1990 年 5 月至 12 月的观测孔实测水头拟合, 进行反复调试参数计算, 直到计算值与实测值拟合达到“最优”时为止。计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j (H_{ij}^o - H_{ij}^c)^2 \quad (34)$$

式中 E 为评价函数; n 为时段总数; m 为观测孔总数; w_j 为权重; H_{ij}^o 为 i 时段在 j 号观测孔的计算水头; H_{ij}^c 为 i 时段在 j 号观测孔的实测水头。拟合的平均误差为 0.81 m。然后用 1989 年 5 月至 1990 年 5 月的历史资料对模型和参数进行检验。结果表明, 模型和参数符合实际。拟合时期各项水资源量列于表 1。由表中可知, 总补给量为 $32.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 补给模数

表 1 参数拟合阶段的各项地下水资源量

Table 1. Quantities of groundwater resources in the fitting period

时 间 (1990年)	降雨 入渗 (m^3/d^3)	灌溉 回渗 (m^3/d)	河流 补给 (m^3/d)	南部地下 水流入 (m^3/d)	总补 给量 (m^3/d)	补给 模数 ($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$)	开采量 (m^3/d)	开采 模数 ($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$)	河流 排泄 (m^3/d)	总排 泄量 (m^3/d)	水量 平衡 (m^3/d)
5月25日 ~6月25日	110208	168494	72448	2504	353654	1673.26	195900	926.87	65221	261121	92533
6月26日 ~7月15日	47972	168494	78598	2504	297658	1407.90	194191	918.79	128727	322918	-25350
7月16日 ~8月5日	54676	168494	277496	2504	503171	2380.68	194191	918.79	2051	196242	306928
8月6日 ~8月30日	97475	168494	369705	2504	638179	3019.45	199011	941.59	0	199011	439168
8月31日 ~9月25日	51703	0	438323	2504	492531	2330.34	202710	959.09	0	202710	289821
9月26日 ~10月25日	14089	0	175696	2504	192289	909.79	196229	928.43	4272	200501	-8211
10月26日 ~11月25日	0	0	47717	2504	50221	237.62	202579	958.47	64587	267166	-216945
11月26日 ~12月25日	0	0	43087	2504	45591	215.71	195672	925.58	55462	251089	-205497
平 均	47015	84247	187883	2504	321651	1521.85	197554	934.70	40040	237595	84055

为 $1521.85\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}^2$ ，总排泄量为 $23.76\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ ，总开采量为 $19.76\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$ ，开采模数为 $934.70\text{m}^3/\text{d}\cdot\text{km}^2$ ，远小于补给模数。这表明地下水补给充分，有扩大开采的潜力。

4.2 污染质浓度拟合

佳木斯市地下水中主要的污染物质为三氮、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、铁、酚、氟、硬度和矿化度。我们取 Cl^- 作为代表性的污染质进行水质模拟的计算。计算时，区域的剖分在原来的水量模型的基础上加密剖分，共划分为533个单元，319个节点，模拟的时间从1989年5月底至1990年5月底，时间步长仍为一个月。拟合情况见表2。拟合求得的参数见表3。然后利用1990年5月底(枯水期末)至8月底(丰水期末)的实测资料，对拟合的结果进行检验。由检验情况(表4)表明，模型和参数是合理的。

表2 1990年5月底(拟合阶段) Cl^- 浓度计算值与观测值对比 单位:mg/L

Table 2. Comparison of computed Cl^- concentrations and observed ones by the end of May, 1990 (fitting period) unit: mg/L

孔号	结点号	计算值	实测值	绝对误差	相对误差(%)
18	204	145.17	133.30	11.87	8.91
53	8	217.39	219.50	-2.11	-0.96
170	254	48.74	82.90	-34.16	-35.89
g1-1	237	14.19	14.20	-0.01	-0.04
Zk4-1	215	6.27	5.30	0.97	18.31
平均值				9.82	12.82

表3 拟合求出的参数

Table 3. Estimated parameters

污染强度 ($\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{d}$)						横向弥散度 (m)	纵向弥散度 (m)
I号污染源	II号污染源	III号污染源	IV号污染源	V号污染源	VI号污染源		
28.90	11.54	6.35	9.25	13.50	8.45	0.016	0.76

表4 1990年8月底(检验阶段) Cl^- 浓度计算值与观测值对比 单位:mg/L

Table 4. Comparison of computed Cl^- concentrations and observed ones by the end of August, 1990 (verification period) unit: mg/L

孔号	结点号	计算值	实测值	绝对误差	相对误差(%)
11	239	4.31	3.50	0.81	23.11
18	204	146.67	189.70	-43.02	-22.68
53	8	245.81	245.70	0.11	0.045
g4	20	5.00	5.30	-0.30	-5.65
平均值				11.06	12.87

5 预 报

5.1 地下水位和水资源量预报

假定降水量和松花江水位取1987年~1990年的平均值，灌溉量和1990年相同。自来水公

司的开采量由 1990 年的 $9.1844 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加到 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。各自备水源地的开采量和 1990 年相同。预报的 2000 年年底的水位如图 1 所示。各项资源量如表 5。预报的 2000 年地下水水位仅比 1990 年下降 3~4m。总补给量为 $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 补给模数为 $1655.95 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$ 。总排泄量为 $38.45 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 总开采量为 $34.83 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 开采模数为 $1647.65 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$ 。补给仍然大于开采, 所以是安全可靠的。

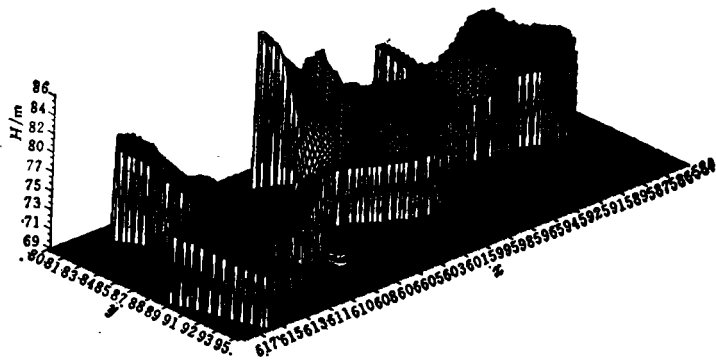


图 1 预报的 2000 年底流场图

Fig. 1. Distribution of predicted groundwater head by the end of 2000

表 5 预测的 2000 年各项地下水资源量

Table 5. Predicted groundwater resources by the end of 2000

月份	降雨 入渗量 (m^3/d)	灌溉 回渗量 (m^3/d)	河流 补给量 (m^3/d)	南部地下 水流入量 (m^3/d)	总补 给量 (m^3/d)	补给模数 ($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$)	开采量 (m^3/d)	开采模数 ($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$)	河流 排泄量 (m^3/d)	总排 泄量 (m^3/d)	水量 平衡 (m^3/d)
1	0	0	127573	2504	130077	615.34	348296	1647.65	65224	413520	-283442
2	0	0	141410	2504	143914	680.80	348296	1647.65	62067	410363	-266449
3	0	0	146477	2504	148918	704.77	348296	1647.65	59810	408106	-259124
4	0	0	17343	2504	175938	832.29	348296	1647.65	48440	396736	-220798
5	34582	168494	259398	2504	464979	2199.63	348296	1647.65	18285	366581	98397
6	65742	168494	273614	2504	510354	2414.28	348296	1647.65	24490	372786	137568
7	83767	168494	338015	2504	592781	2804.21	348296	1647.65	20325	368621	224159
8	110721	168494	471347	2504	753067	3562.74	348296	1647.65	8906	357202	395864
9	51712	0	486676	2504	540893	2558.74	348296	1647.65	1144	349440	191452
10	21852	0	390942	2504	415298	1964.64	348296	1647.65	2731	351027	64271
11	0	0	177362	2504	179866	850.88	348296	1647.65	52293	400589	-220722
12	0	0	141956	2504	14460	683.39	348296	1647.65	71293	419589	-275128
平均	30698	56146	260383	2504	350051	1655.95	348296	1647.65	36251	384547	-34495

5.2 地下水水质预报

最后, 利用水质模型进行污染质浓度的预报。考虑二个方案: 第一方案是污染状况和 1992 年时相同, Cl^- 污染没有得到治理。第二方案是 1993 年开始污染源得到彻底治理, 已经被清除。第一方案 1995 年 5 月底的 Cl^- 浓度分布图见图 2。第二方案同期的 Cl^- 浓度分布图见图 3。二种方案 1995 年 5 月底的预报结果见表 6。由图 2、图 3 和表 6 可知, 如果按第一方案,

由于污染物在地下水中的积累，1995年的浓度比 1989 年高得多，有 5 个地点 Cl^- 浓度超过 250mg/L，不符合饮用水的标准。地下水受污染的面积也逐年扩大。第二方案地下水污染总的趋势是减轻的，但漏斗中心区污染物的浓度反而增高，这是四周被污染的地下水向漏斗中心汇集的结果，也表明地下水水质的恢复是一个长期过程。

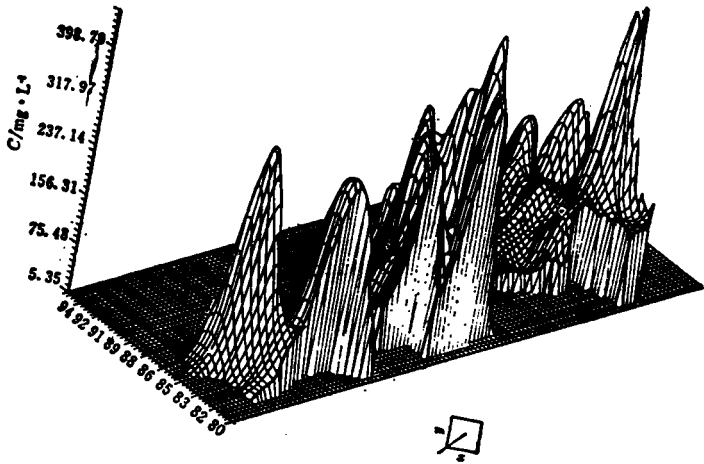


图 2 1995 年 5 月底计算的 Cl^- 浓度场(第一预报方案)

Fig. 2. Distribution of computed Cl^- concentrations by the end of May, 1995 (the 1st scheme)

表 6 1995 年 5 月底 Cl^- 浓度预报结果 单位:mg/L

Table 6. Predicted Cl^- concentrations by the end of May, 1995 unit:mg/L

孔号	结点号	1989 年 5 月底 Cl^- 浓度	1995 年 5 月底 Cl^- 浓度	
			第一方案	第二方案
MJ171	211	39.16	44.87	44.73
MJ1700	180	78.84	82.93	36.20
MJ1747	27	124.70	254.38	36.20
MJ1750	43	8.76	9.70	6.85
MJ814	118	26.28	30.31	5.99
MJ159	207	25.77	34.59	30.11
MJ1047	149	26.28	30.33	8.73
MJ39	158	29.37	43.74	6.29
MJ29	156	85.54	94.96	44.96
MJ840	271	53.59	134.92	64.91
ZK10	143	32.46	33.46	13.20
MJ1711	190	233.43	419.13	214.62
MJ851	93	103.06	256.63	126.93
MJ1731	22	5.67	5.70	5.50
MJ24	269	126.25	332.04	187.33
36	77	95.40	103.95	88.11
53	8	238.20	383.95	42.15
170	254	42.20	44.66	14.00
18	204	139.30	147.36	115.04

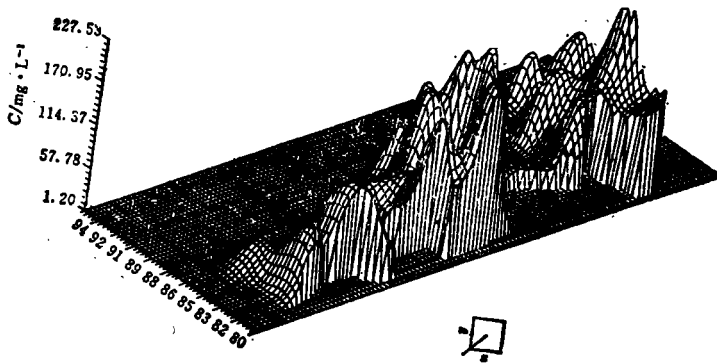


图3 1995年5月底计算的 Cl^- 浓度场(第二预报方案)

Fig. 3. Distribution of computed Cl^- concentrations by the end of May, 1995 (the 2nd scheme)

6 结 论

(1) 利用本文建立的水量模型和水质模型进行地下水资源评价和地下水污染的评价和预测, 其结果表明, 模型是合理的, 参数是恰当的, 有实用价值。

(2) 求解水质模型的特征有限元法, 能消除数值弥散和数值振荡, 对于对流占优势的问题相当有效。为使该方法实用化, 本文提出了确定运动水质点所在单元的方法, 研究了如何计算流速场。

(3) 计算结果表明本区的地下水资源比较丰富。到2000年能满足城市发展的需要。

(4) 水质预测的结果表明, 如果不进行污染源治理, 由于污染物在地下水中积累, 将造成污染面积扩大, 污染浓度增高。即使消除了污染源, 水质的恢复也是一个长期而缓慢的过程。所以地下水污染的防治非常重要。

参 考 文 献

- 1 朱学愚, 钱孝星, 刘新仁. 地下水资源评价. 南京: 南京大学出版社, 1987: 58~69
- 2 Zhu Xueyu, Xie Chun hong. A method of finite element combined with a characteristic technique for solving 2-D contaminant transport in an aquifer, Contaminant Transport in Groundwater, Rotterdam: A. A. Balkema, 1989: 327~332
- 3 朱学愚, 谢春红. 地下水运移模型. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 162~166
- 4 Neuman S P. Adaptive Eulerian-Lagrangian finite element method for advection-dispersion. Intern. J Numer. Methods in Eng., 1984, 2
- 5 Yeh G-T. On the computation of Galerkin velocity and mass balance: the finite element modeling of groundwater flow. Water Resources Research, 1981, 17 (5): 1529~1534

Modeling of Groundwater Quantity and Quality in Jiamusi City

Zhu Xueyu and Sun Kerang

(*Nanjing University, Nanjing, 210008*)

Abstract: Jiamusi is an industrial city in north-east of Heilongjiang Province. Groundwater is the main source for water supply in this city. Two-dimensional mathematical models for groundwater resources and quality with their field applications in Jiamusi City were presented in this paper. The groundwater resource model was approached by a finite element method (FEM) and groundwater resource in this district was evaluated with the established model. The groundwater quality model was solved by a characteristic finite element method (CFEM). Numerical dispersion and oscillation were effectively reduced by using this method. Additionally, a simple but effective method was used to determine the serial number of the element where moving particle located, which is very important for the application of CFEM. The future distribution of contaminant concentrations in this area was predicted in the end of this paper.

Key words: groundwater resources; assessment of water resources; advective-dispersive equation; characteristic finite element method; groundwater pollution prediction.