

# 山东省济宁市地下水水质模拟及其污染趋势预测试验研究之三

许人冰

(山东省地质矿产局)

## 一、模型的校正

为了解在初步查明研究区水文地质条件基础上所建立的该区地下水水质模型及其计算程序是否正确与可靠,就必须对程序进行检验和对模型进行校正。本次试验研究对程序是利用一维弥散解析法检验的,而模型校正则是把实际资料代入所建立的模型中试算,考察研究区模型水量、水质动态变化的再现状况。一般要取得研究区2—3个水文年度的地下水水位及某种污染质浓度的统测值,选其一组作为初始条件,确定相应边界;再根据测定的有关水文地质参数,输入计算机程序中。经过一系列调整后,如计算的与实测的水位分布及浓度分布十分接近或在预定目标内,则认为参数、模型是可信的和可靠的。因此,经过校正的地下水水质模型,就可以作为研究区的一个模拟系统,根据有关单位提出在今后某一时期内不同的水量开采及水质治理方案进行预测。人们可比较不同实施方案影响下的不同预测结果,权衡利弊,选取最佳方案,使地下水得以充分利用的前提下,控制其有害物质含量在对人体健康不致产生威胁的范围内。

### (一) 有限单元法的模型校正

#### 1. 程序的功能

可用于计算以下问题:(1)第一类,第二类及一、二类混合边界条件下的地下水稳定流和非稳定流的水位;(2)第一类、第二类及一、二类混合边界条件下的地下水流速及地下水中某种可溶性物质的浓度;(3)连续预测多个时段在各种不同边界条件下的地下水水位和某种污染质浓度的分布。

程序不受水位边界和浓度边界需要一致的限制。在一定的条件下计算水位后,可以修改边界条件再计算污染质浓度。程序考虑了吸附的情况。

#### 2. 程序的检验

设有一均匀的各向同性的含水层。计算区剖分情况如图1所示。

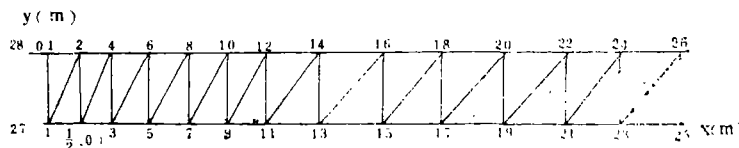


图1 计算区剖分

已知有效孔隙度 $n = 0.5$ ; 渗透系数 $k = 0.5 \text{ m/min}$ ; 弥散系数 $D = 0.1 \text{ m}^2/\text{min}$ ; 边界点水

位 $H_{27} = H_{28} = 1\text{m}$ 、 $H_{25} = H_{26} = 0\text{m}$ ；边界点溶质浓度 $C_{27} = C_{28} = 10\text{g/l}$ 、 $C_{25} = C_{26} = 0\text{g/l}$ 、 $C_0 = 10\text{g/l}$ 。

由于上述情况为一维渗流问题，故其它均为内节点。内节点的水位数值如表1所示。

表1 节点水位数值表

X坐标(m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
对应节点的水位H(m)	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10

该例题的地下水流速和溶质浓度计算公式为：

$$V = -\frac{k}{n} \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$c(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}}\right) + \exp\left(\frac{vx}{D}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}}\right) \right]$$

其中

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u)$$

而

$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$$

利用有限单元数值法和解析法求得的水流流速和第30分钟时溶质浓度的计算结果见表2。

表2 有限单元法和解析法计算结果表

内容	方法	x坐标											
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
流速 (m/min)	解析解	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	数值解	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
浓度 (g/l)	解析解	9.721	9.312	8.767	8.122	7.281	6.429	4.305	2.776	1.314	0.743	0.297	0.0955
	数值解	9.67	9.28	8.66	8.05	7.35	6.55	4.40	2.81	1.41	0.76	0.28	0.11

由表2可以看出，各时段的数值解与解析解基本接近。图2说明有限单元计算程序是可靠的和切实可行的。

### 3. 模型的校正

在模型校正的计算中，分长、短两个时段进行。其中长时段是从1931年6月28日至1982年6月10日和从1982年6月10日至1983年6月23日，分别为347天和378天；短时段是从1982年5月21日至6月10日，计20天。

短时段计算水位拟合实测水位的最大绝对误差不超过0.917m，绝对误差在0.5m以下的

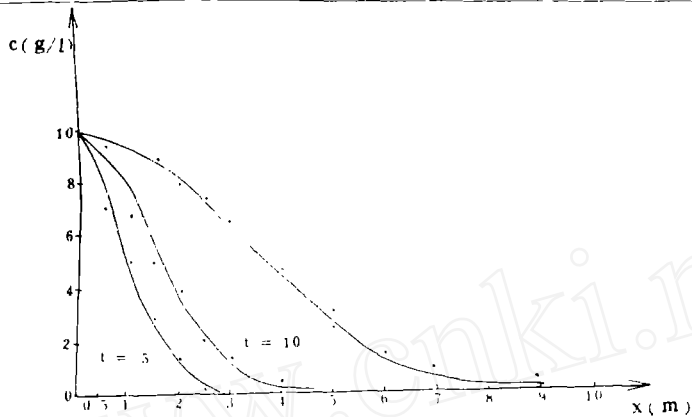


图2 有限单元法和解析法计算结果对比图  
——解析法曲线；····有限单元法点线

占总计算点数的70%以上。平均绝对误差为0.3809m。而计算浓度拟合实测浓度的最大绝对误差则不超过0.02487g/m<sup>3</sup>，绝对误差在0.006g/m<sup>3</sup>以下的占总计算点数的80%。平均绝对误差为0.004288g/m<sup>3</sup>。由此看来，短时段水量和水质部分的计算精度是比较高的，达到了计算水位与实测水位误差小于0.5m、计算浓度与实测浓度误差小于0.005g/m<sup>3</sup>的预定目标。其曲线拟合较好（见图3和图4）。

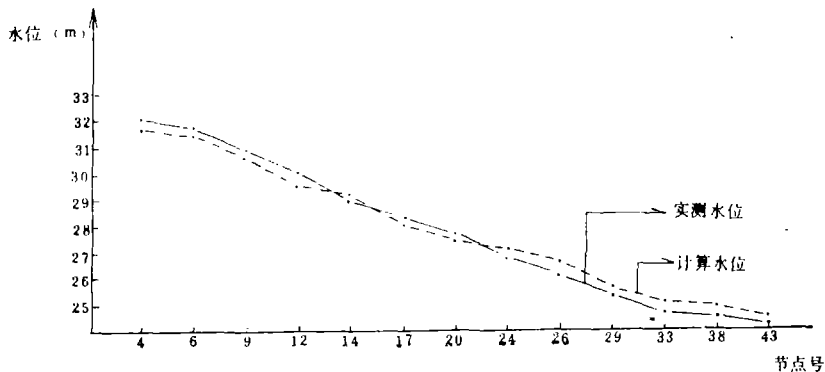


图3 短时段水位拟合曲线图

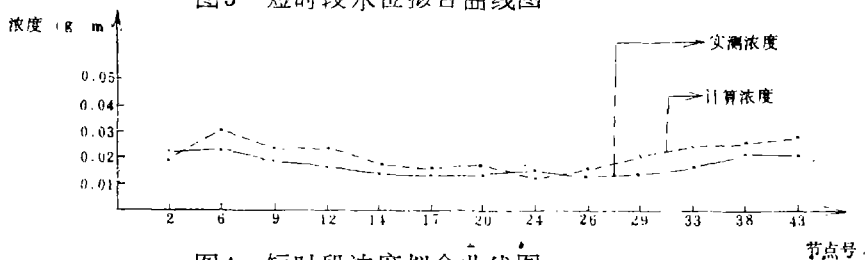


图4 短时段浓度拟合曲线图

在完成短时段计算的基础上，利用短时段的水文地质参数再对长时段的资料进行计算。计算水位拟合实例水位的最大绝对误差不超过0.991m，平均绝对误差为0.34m，达到了水位计算预定的精度要求标准。而计算浓度拟合实测浓度的最大绝对误差不超过0.0177g/m<sup>3</sup>，平均绝对误差为0.00524g/m<sup>3</sup>，接近于浓度计算预定的精度要求标准。因此，计算水位、浓度与实测水位、浓度基本上是吻合的。

在完成长时段初始时段的计算后,对水位和水质又经过多个时段的计算,验证了优选确定的水流参数和水质参数是可靠和合理的。表3是选取第二时段(从1982年6月10日至1983年6月23日)的部分观测节点的末刻水位和浓度的验算结果。

表3 长时段水位、浓度验算结果表

区号	节点号	计算水位 (m)	实测水位 (m)	绝对误差 (m)	计算浓度 (g/m <sup>3</sup> )	实测浓度 (g/m <sup>3</sup> )	绝对误差 (g/m <sup>3</sup> )
I	4	32.102	32.217	0.115	0.04918	0.033	0.0161
	12	29.663	29.264	0.399	0.02732	0.035	0.00768
	18	30.213	29.676	0.537	0.01756	0.025	0.00744
II	20	27.488	26.497	0.991	0.01774	0.030	0.01226
	26	25.531	25.829	0.298	0.01727	0.015	0.00227
	74	27.675	28.182	0.507	0.01389	0.021	0.00711
III	32	23.648	24.326	0.678	0.02231	0.017	0.00513
	34	24.453	25.221	0.761	0.02581	0.027	0.00119

以上长、短时段的验算表明,计算节点的计算结果和以前的历史资料对比,是基本符合的。即计算模型与模拟区的实际水文地质条件比较接近。因此,所建立的地下水水质模型是正确的、合理的。

## (二)有限差分法的模型校正

### 1.程序的功能

本程序可用于下列问题:

(1)第一类、第二类及一、二类混合边界条件下承压水的稳定流、非稳定流的水位变化和浓度变化问题,也可单用于水量方面资源评价问题;

(2)它虽然属于平面二维模型,但能考虑垂直补给问题,如果对程序稍加修改,还可用于吸附、化学反应问题;

(3)程序中允许贮水系数、导水系数、含水层厚度、孔隙度、纵向及横向弥散度等参数在每个单元都有不同的值,而且利用节点识别符号数组控制各种情况下的边界条件,灵活方便,可用于计算野外各种条件下的问题;

(4)可以再现和预报不同抽水周期流速分布、水量平衡情况、溶质浓度分布、纵向和横向弥散系数分布,以及物质平衡情况。

### 2.程序的检验

在进行水动力弥散试验时,二维流情形下的弥散系数D通常用以下微分方程来确定:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_L \left( \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) + D_T \left( \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) - V_A \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2-1)$$

式中：C为溶质浓度； $V_A$ 为同一流线上地下水流平均流速； $x$ 、 $y$ 为笛卡尔坐标（ $x$ 轴沿流向， $y$ 轴垂直于流向）； $t$ 为时间； $D_L$ 、 $D_T$ 分别是纵向和横向弥散系数。

对于各向同性和均质的多孔介质的二维水流模型，瞬时注入示踪剂溶液并充满整个含水层，此时(2-1)方程的初始条件和边界条件为：

$$C(0, y, t) = \frac{A}{nhV_A} \delta(x) \delta(y)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} C(x, y, t) = 0 \quad \lim_{y \rightarrow \infty} C(x, y, t) = 0$$

$$C(x, y, 0) = 0 \quad x > 0 \quad y \neq 0$$

式中：A为加入示踪剂的总量； $n$ 为有效孔隙度； $\delta(x)\delta(y)$ 为变量 $x$ 、 $y$ 的狄拉克函数。

对于上面的边界条件和初始条件，(2-1)的解为：

$$C(x, y, t) = \frac{Ax}{4\pi n V_A h t^2 (D_L D_T)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\left( \frac{(x - V_A t)^2}{4D_L t} - \frac{y^2}{4D_T t} \right) \right]$$

在对应的边界条件下和初始条件下，如果是一维稳定水流通过均匀的各向同性的含水层，其解析解为：

$$C(x, t) = \frac{Ax}{nF V_A t (4\pi D_L t)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{(x - V_A t)^2}{4D_L t} \right] \quad (2-2)$$

式中：F是含水层的截面。

$$D_L = \alpha_L V_A$$

$$\frac{C(x, t) - C_0}{C_1 - C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( -\frac{X - gt/n}{\sqrt{4D_L t}} \right)$$

设 $V_A = 9.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ； $n = 0.5$ ； $\alpha_L = 3.04$ ； $t = 10$ 天。

把上述数据代入解析解和利用计算机程序求得该问题的数值解，并将它们的计算结果绘制为图5，可以看出，解析解计算的浓度与数值解计算的浓度之间的差很小，说明有限差分法计算程序是可靠和切实可行的。

### 3.模型的校正

为了便于和有限单元法计算结果进行对比，对其参数值没有按节点分别给出，而是根据有限单元法的分区给出。并在模型校正过程中，对局部地段的参数再结合实际资料作必要调整。

(1)比较水头分布：由于原来考虑到8.3、8.4、8.5、8.6、和8.7单元（见试验研究之二，图8）位于西部抗生素厂和东部酿造厂为中心的两个漏斗的分水岭地带，故把这五个单元按隔水边界处理。通过计算，上述五个单元均产生了较大的正水头差，说明由于计算区西北部（即抗生素厂附近）开采强度较大，仍存在东部漏斗的侧向补给；2.3和2.4两个单元的正水头差较大，说明在小范围内侧向补给亦偏小。经过调整得到计算区1981年6月28日实测水位与第一时段相隔三天的计算水位之间的差值（见表4），表明计算水位与实测水位已较好地吻合。另外，把调整前的1982年6月10日的计算结果与实测资料相比较，可以看出计算水位普遍高于实测水位，有的差值竟达1m之多。通过对原始资料的进一步分析研究，认为计

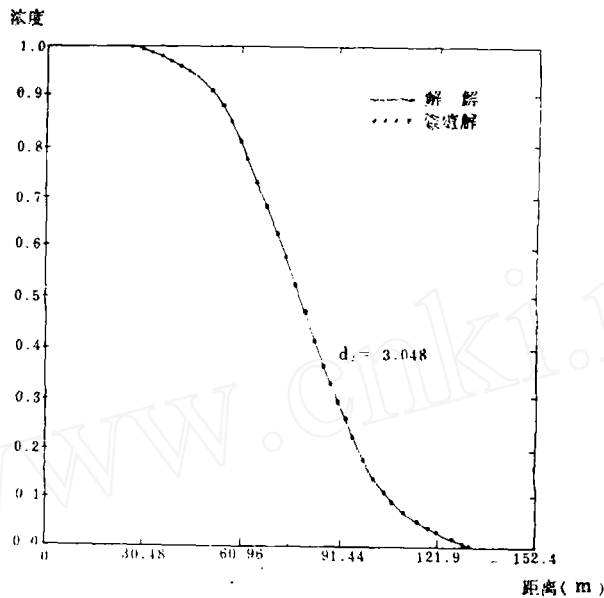


图5 解析解与数值解比较

—解析解；···数值解

算区虽然大部分为农田灌溉区，但由于承压含水层埋藏一般均较深，且顶板上多复盖一定厚度的弱透水岩层，故灌溉回归水和大气降水通过地表直接补给下部承压水的水量是十分微小的。主要还是通过沟、河排至定水头边界处，以定水头形式补给地下水。因此，适当缩小了计算区的越流系数，得到1983年6月23日的计算结果与同一天的实测资料相比较，虽然总的说来有了基本接近的趋势，但在2.3和2.4两单元计算水位仍然偏高，这是由于在该地区的局部地段，含水层介质颗粒较粗，地下水流速较大，测得的渗透系数值有的可达65m/日之多，从而又适当地提高了2.3和2.4两个单元的导水系数。通过这一系列调整后，计算水位和初始水位与两次实测水位之间的误差基本保持在0.5m以下，达到了预定的精度要求。

(2)比较水量平衡：地下水均衡理论的基本观点，可用下式表达：

$$\frac{ds}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2-3)$$

式中： $Q_{in}$ 为单位时间计算区的补给量； $Q_{out}$ 为单位时间自计算区流出量。

依据所列公式计算，确定了下述的均衡项：

单元越流量为：

$$\frac{K'}{m'} \Delta x \Delta y (wT_{ij} - HK_{ij}) \quad (2-4)$$

计算区越流累计量为：

$$\sum_i \sum_j \frac{K'}{m'} \Delta x \Delta y (wT_{ij} - HK_{ij}) \quad (2-5)$$

计算区释放总量为：

$$\sum_i \sum_j (H_{oij} - HK_{ij}) \Delta x \Delta y S_{ij} \quad (2-6)$$

计算区累计纯抽水量为：

$$\sum_i \sum_j (Q_{ij} + Q_{Ri} \Delta x \Delta y) \quad (2-7)$$



式中,  $Q_{Rij}$  为单元  $i, j$  侧向补给量。

流量平衡剩余 = 累计纯抽水量 - 累计越流量 - 释放总量

$$\text{误差百分比} = \frac{\text{流量平衡剩余} \times 100}{0.5 \times \text{总通量}}$$

如果计算区的平衡剩余量等于总通量时, 则水量平衡误差百分比为:

$$\text{误差百分比} = \frac{(\text{流入越流量} - \text{流出越流量}) \times 100}{\text{流入越流量}}$$

上述计算过程由计算机自动完成, 并打印出有关的均衡项和均衡误差百分比。这些量值对于校正模型是有很价值的, 它提供了多种因素在总的均衡中相对重要性的量度。如果误差百分比太大, 或说明模型有错误, 或说明边界水量通量、初始条件、边界条件等存在某种不当之处, 需要进行必要调整。不过, 水量均衡的调整往往要和水位差的调整同时进行。例如, 计算中当单元越流系数确定在 0.0004—0.0006 和 0.0001—0.0005 之间时, 输出的第一时段有关水均衡项的数值如表 5 所示:

表 5 单元越流系数与水均衡关系表

水均衡项	累计抽水量	释 放 量	总 越 流 量	物质平衡剩余	水均衡误差百分比	
单 元 越 流 系 数	0.0004 —0.0006	$0.14558 \times 10^5$	$0.6383 \times 10^4$	$0.81735 \times 10^4$	1.1152	$0.9811 \times 10^{-2}$
	0.0001 —0.0005	$0.16175 \times 10^5$	$0.9445 \times 10^4$	$0.67295 \times 10^4$	$0.51203 \times 10^{-1}$	$-0.45495 \times 10^{-3}$

不难看出, 这些数值以及其它时段输出的水均衡的数值信息, 为上面提到的水位差的调整提供了重要依据。

(3) 比较浓度差: 在计算中可输出每一个单元实测浓度值, 计算浓度值以及二者之差。如对比 1981 年 6 月 28 日实测总铬浓度分布与计算总铬浓度分布之差值 (见表 6), 除邻近红旗五金电镀厂主要污染源的两个单元的差值大于  $0.001 \text{g/m}^3$  外, 其它计算单元之差值均小于  $0.001 \text{g/m}^3$ , 说明模型经过校正后, 计算与实测的总铬浓度吻合较好。同时得到 1982 年 6 月 10 日之计算总铬浓度与其实测总铬浓度的平均绝对误差亦都小于  $0.005 \text{g/m}^3$ , 符合预定的精度要求。另外, 在此基础上还以 1981 年 6 月 28 日资料为初始条件, 模拟了 1983 年 6 月 23 日的水位及水质动态情况, 计算结果亦基本一致。从而证实了模型能够再现济宁市区地下水水质和水量的变化规律。

(4) 比较物质平衡: 为了检查数值解的精确性, 程序对每一时段都进行了物质平衡计算, 同时取得每一时段的平衡误差百分比、流入边界的物质量、流出边界的物质量、流入物质量与流出物质量之差、物质初始贮存量、物质现在贮存量、物质释放量以及物质平衡差等数值。比较时可视具体情况, 选其平衡差百分比。如误差太大, 通常表明计算中存在较大的错误, 必须查明原因。表 7 是计算机打印出的关于 1981 年 6 月 28 日 (初始时刻) 和 1982 年 6 月 10 日的物质平衡情况。



表7 不同时刻物质平衡情况表

均 衡 项	1981.6.28	1982.6.10
HEMICAL MASS BALANCE		
MASS IN BOUNDARIES	0.21455D + 04	0.11403D + 06
MASS OUT BOUNDARIES	-0.70749D + 00	-0.12817D + 01
MASS PUMPED IN	0.54610D + 03	0.93488D + 04
MASS PUMED OUT	-0.11907D + 04	-0.13308D + 06
INFLOW MINUS OUTFLOW	0.15002D + 04	0.96989D + 04
INITIAL MASS STIRRED	0.15301D + 07	0.15301D + 07
PRESENT MASS STORED	0.15531D + 07	0.20856D + 07
CHANGE MASS STORED	0.22911D + 05	0.55541D + 06
COMPARE RESIDUAL WITH NETFLUX AND MASS ACCU- MULA TION:		
MASS BALANCE RESIDUAL	-0.21411D + 05	-0.56511D + 06
ERROE (AS PERCENT)	-0.17542D + 03	-0.20711D + 03
COMPARE INITIAL MASS STORED WITH CHANGE IN MASS STORED:		
ERROE (AS PERCENT)	0.14006D + 01	0.36699D + 02

在本次试验研究中,经过物质平衡计算,研究区内总铬的平衡误差百分比值较小,亦证实了模型是符合济宁市的实际情况。

## 二、地下水污染趋势预测

制定地下水水质和水量预测方案是一项十分复杂的工作。就其发展趋势而言,将涉及到法律、社会和政治等很多方面。从水文地质技术要求来说,可有地下水开采量与污染质浓度维持现状或保持相对稳定、有继续增加趋势、计划限制稳中有减等方案及其组合。如:开采量与污染均为增加趋势方案、开采量增加污染情况不变(或减轻)方案、开采量不变污染加重(或减轻)方案、开采量与污染情况均维持现状方案、开采量及污染程度均确定递减方案、开采量减小污染加重(或不变)方案等等。并根据某方案整理成相应数据,输入模型中,将其输出结果作为制定合理决策方案的参考。

本次试验研究在编制上述方案时,专访了济宁市人民政府等有关部门,进一步落实该城市建设的规范化、工农业布局的调整和对水量水质的要求等。同时还走访了市环境保护局及造成总铬污染较严重的主要工厂、企业,详细了解其发展计划和对总铬污染采取的防治措施,

以及排放方式、排放途径的变化等。以调查结果作为编制地下水水质预测方案的依据，对今后不同时间段的地下水污染发展趋势进行预测。

### （一）有限单元模型的预测及其结果

根据本次试验研究过程中所取得完整可靠资料的时间，把地下水污染趋势的预测，建立在1981年枯水期之6月28日以后相同的一定时期内，同时再按照上述有关部门提供的人为因素的直接或间接影响，作出可能产生的水质、水量变化的定量估算，经过综合分析后，主要表现为地下水污染源、污染途径以及地下水开采量在不同时段内的差异，作为地下水污染趋势预测的条件。另外还照顾到预测条件的多样性和适应预测条件的可能变动，因此，总共归纳为以下五种预测条件和九个预测时段。

#### 1. 预测条件

第一种预测方案：地下水污染源、污染途径和地下水开采量与1981年6月28日的资料相比，无显著变化，即在各种条件不变情况下，进行不同时间段的地下水污染趋势预测。这是由于济宁市的各级领导，在近些年该城市发展的实践过程中，已觉察到地下水污染与地下水超量开采所出现问题的严重性，并已采取相应的措施。

第二种预测方案：根据工作区内的主要用水大户——济宁发电厂、济宁抗生素厂等立即采取自远距离管道输水。增加用水循环次数及其它节水措施，预计每日开采量可减少2.7万吨左右（是计算影响范围内原开采量的1/4）；同时对污染地下水的工厂实行控制，使其总铬浓度大体保持不变。按照第一种预测方案实施时，第Ⅲ区（即开采区）1983年计算水位较实测水位均普遍偏低，而按照第二种方案实施，与1983年取得的资料基本相符。

第三种预测方案：是考虑到城市工业发展的自然增长率和用水量、污染浓度相应增加的关系提出的。由于济宁市在南水北调和石（臼所）——新（乡）铁路建成投入使用后，将成为“西煤东调、北煤南运”的重要集散地。发电能力及化工、机械等企业的新产品必然会相应增加。地下水开采量在1981年6月28日的基础上，在既严格控制又保证生产正常发展的前提下，预计需要增加10%。而总铬污染程度相应增加1/2倍。

第四种预测方案：根据济宁市规划，位于市中心的济宁电镀厂——本次模拟的主要污染源之一——将迁出市中心并远离模拟区；加之主要污染河流——老运河、越河已相继开始分段修整。红旗五金电镀厂也在逐步转产中，其废水排放量日益减小，且废水坑塘亦不复存在。故可按定浓度边界减少2/3，而使地下水目前的开采量基本保持不变进行预测。

第五种预测方案：预计地下水开采量增加10%，定浓度边界保持相对稳定。该方案对济宁市来说可能性甚小，因为增加开采量已引起有关部门的高度重视，而且不久的将来，济宁市北远郊的新供水水源地相继投产，市区地下水超量开采的现状会迅速得到缓和；而且定浓度边界保持不变亦只能是相对的。但从地下水污染趋势预测所出现的各种可能性，而增设此种预测方案。

#### 2. 预测时段

由于本地区的枯、丰水期界线分明，每年五、六月份属枯水期，降水甚少。据三年监测资料，地下水总铬含量亦明显升高，成为该市当前或潜在威胁的主要时期，也是试验研究中预测时段划分的基点。具体为从1981年至1990年共划出九个时段（见表8）。



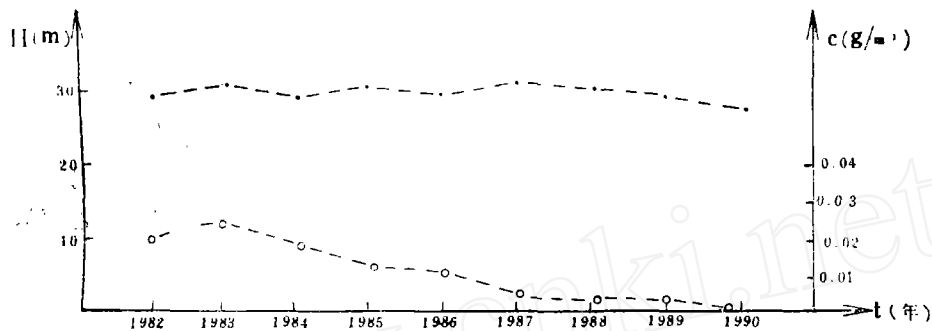


图7 II区20号节点预测水位曲线(H)和浓度曲线(C)

-----水位曲线; -----o-----浓度曲线

测条件的改变,下降幅度也更为显著。第四预测方案得到模拟区的总铬平均浓度值是逐年下降的,其下降速度为每年 $0.00447\text{g}/\text{m}^3$ 。因此,如按市领导和市规划部门的意见,将济宁电镀厂迁往远郊、红旗五金电镀厂继续转产、彻底整修老运河及越河等污染河流,则地下水开采量将基本保持不变,其总铬污染程度逐年减小,模拟区内外的污染源峰值渐趋消失,预计三年后污染情况会有较明显的好转。

(2) 五种预测方案的综合评价:第一,若济宁市区不采取任何防治污染措施,用第三或第一方案预测未来五年、九年的地下水总铬浓度的发展趋势,可以得到总铬浓度将逐年增加的结果,增加速度为每年平均 $0.0035\sim 0.0045\text{g}/\text{m}^3$ 。第二、济宁市区若采取一些小规模的防治污染措施,则如同第一方案的预测结果,即以后每年地下水总铬浓度可能略有增加,但变化不甚显著,基本保持相对稳定;若采取第四方案的搬迁济宁电镀厂、红旗五金电镀厂转产及修整已污染的河流等,即在消除主要污染源的条件下,则地下水总铬浓度会有较大幅度的下降,在头三年内平均每年下降 $0.00292\text{g}/\text{m}^3$ ,以后仍继续逐年下降。第三、当济宁市仅采取措施维持污染现状,而地下水开采量仍有不同程度的增加(或减少),即按第五(或第二)方案所预测第三时段的地下水水位数值,与第一方案比较,地下水流速有较明显的增大(或减少),地下水位亦有较明显的下降(或上升)趋势。其地下水总铬浓度的大小,与第一方案相比较,无显著变化。

## (二) 有限差分模型的预测及其结果

### 1. 预测条件

由于有限单元模型中已提出了五种方案进行预测,为便于与其对比,本模型主要考虑了济宁市目前较突出的问题,同时也结合在今后数年中能够付诸实现,即以控制地下水开采量不再继续增大、地下水总铬浓度维持现状和逐步进行治理的方案进行预测。此方案与有限单元模型的第一种预测方案大致相同。

### 2. 预测时段

有限差分法计算模型的预测亦是以1981年6月28日的地下水水位、总铬浓度及其参数组为基础,中间结果与1982年6月10日的实测资料进行对比,而实际预测为从1983年9月23日开始,至1988年6月23日为止,预测五年内地下水污染的发展趋势。共分为50个时段,即每年分为10个时段。

### 3. 预测结果及分析

根据预测数值可以看出,当地下水开采量相对地保持在1983年的水平上,其中包括济宁发电厂继续由外地每日引水1.2万吨、抗生素厂等用水大户亦不断采取节水措施,那末今后,地下水位在预测的时段内仍继续缓慢下降,且1985年以前之下降速度略快,在临近地下水集中开采区的地下水位下降幅度较远离集中开采区的明显偏大。而且如现有污染源及其排放浓度、排放途径相对稳定,则地下水中总铬含量将不断上升,并且靠近污染源地带较远离污染源地带的上升幅度为大。

#### (三) 有限差分模型与有限单元模型计算结果的对比

由于有限差分模型与有限单元模型的剖分方式不同,导致计算面积和边界范围有着一定差异,而要求二者在计算中的初始条件和边界条件的处理完全相同是难以做到的。尽管如此,两个模型的计算结果还是比较接近的(见表9、表10)。

表9 7.9单元与20号节点计算结果对比表

方法 项目 时间	有限差分模型		有限单元模型	
	水位(米)	总铬浓度(克/米 <sup>3</sup> )	水位(米)	总铬浓度(克/米 <sup>3</sup> )
1983.6.23	28.3830	0.01599	27.436	0.01945
1984.6.23	27.9141	0.02280	29.017	0.02707
1985.6.23	27.9637	0.02876	28.486	0.03330
1986.6.23	27.9637	0.04282	28.977	0.03644
1987.6.23	27.9637	0.04968	27.519	0.05100
1988.6.23	27.9637	0.06620	28.950	0.05270

另外,两种方法的相互验证,更加说明了根据济宁市的具体情况所建立的上述两个模型是正确的,预报的结果亦是可靠的,可作为有关部门采取相应措施的科学依据。

## 三、 结 论

1. 根据济宁市的具体水文地质条件和地下水水质污染特点,建立了准三维的地下水水质模型,并采用了多种方法计算、验证,同时与实际资料加以对比,证明所建立的模型是合理的,可靠的,具有一定的通用性。只要稍加修改,便可用来解决承压水、潜水以及混合类型地

表10 5.3单元与39号节点计算结果对比表

方法 项目 时间	有限差分模型		有限单元模型	
	水位(米)	总铬浓度(克/米 <sup>3</sup> )	水位(米)	总铬浓度(克/米 <sup>3</sup> )
1983.6.23	24.2344	0.03195	24.489	0.01973
1984.6.23	23.6276	0.04421	24.991	0.03313
1985.6.23	23.6276	0.04374	24.537	0.04056
1986.6.23	23.6276	0.06190	24.956	0.05015
1987.6.23	23.6276	0.07670	24.561	0.07311
1988.6.23	23.6276	0.08630	24.939	0.01597

下水的污染等实际问题。

2.本次对济宁市地下水污染发展趋势的试验研究,在按几种方案进行的预测中可以明显看出:通过对比不同的防治地下水污染技术对策而采取相应的治理措施,就可以在很大程度上改善已遭受污染的地下水水质,从而为人们积极进行地下水污染的防治工作树立了信心。

3.当前在地下水污染研究中,弥散系数的野外测定方法仍属薄弱环节,有待进一步改善。试验研究表明,在地下水污染发展趋势预测中,仅仅是孔隙度值域变化最敏感,影响显著,而弥散度在剖分面积较小的情况下,对预测的影响不十分明显,但仍可清楚地看到弥散作用对计算结果精度的影响。这就给人们一个启示,即如果条件允许,就必须重视并大力进行弥散现象的机理及弥散系数室内、外测试技术的研究,这无疑将具有重要的理论与实际意义。然而,如果技术与经济实力有限,进行弥散系数的现场测定工作确有困难时,可考虑借助类比法,选择适当的弥散参数值,进行地下水水质模型的求解和预报,这对迅速推动我国地下水污染的研究工作是有益的。

4.弥散系数野外测定的井孔布设,在地下水流向比较准确的条件下,其扇形面以地下水主流线两侧 $15^{\circ}$ — $20^{\circ}$ 夹角为宜。在地下水流向不十分准确时,一般亦不超过 $30^{\circ}$ — $45^{\circ}$ 。具体观测孔可采用梅花状布设,主流线上通常不少于两个。为提高所测得弥散系数的可靠程度,可利用两种以上示踪剂平行测定,互相对比。

5.济宁市的研究实践证明,在地下水水质模拟试验研究工作中,必须十分注意运用多种

数值方法进行计算,相互对比验证,这是提高模型可靠性、准确性的重要途径。因为每种数值法都能从不同侧面给研究者提供校正模型的有用信息。本次试验研究不仅采用了有限单元法、有限差分法,而且还采用了我们提出的函数磨光法,并运用了国外文献资料中已有的特征法。这后两种方法是克服数值弥散的有效方法,值得推广应用。

6.在地下水水质模拟及其污染趋势预测的计算过程中,必须充分注意模型校正。济宁市的实践经验是,进行对比的周期越长,校正的可靠性越高。而在这一过程中,计算水量平衡和物质(浓度)平衡,则是检验数值解可靠与精确程度的一个重要量度。

7.本次试验研究虽然只对一种污染质——总铬的污染发展趋势进行预测,但由于所编制和采用的计算机程序有其通用性,故今后可在此基础上,进一步对研究区内地下水中的其他污染物质分别进行模拟、评价和预报。

### 参 考 文 献

- [1] 山东省地质矿产局第三水文地质队, 1980, 山东省济宁市水源污染调查报告。
- [2] 柴崎达雄等著, 王秉忱译, 1982, 地下水盆地管理。地质出版社。
- [3] R.威利斯, 地下水水质管理的规划模型。《水文地质工程地质译丛》1982, 第三期。
- [4] J.Fried, 1975, Groundwater pollution (Theory, Methodology, Modelling and Practical Rules) .
- [5] В.М.Цестаков, 1979, Динамика подземных вод.
- [6] 杨金忠, 1983, 溶质运移问题的有限元解法及其在地下水水质改良中的应用。《水文地质工程地质》, 第1期。
- [7] 林学钰, 1983, 美国地下水资源管理概况。《水文地质工程地质》, 第2期。
- [8] J.贝尔著, 李竟生、陈崇希译, 1983, 多孔介质的流体动力学。中国建筑工业出版社。
- [9] Н.А.Маринов, 1982, Гидрогеологические Исследования За Рубежом.
- [10] 王秉忱 杨天行、侯印伟、许人冰、尹宝瑞, 1981, 地下水水质模拟试验研究的基本理论与计算方法。《长春地质学院学报》, 第3期。
- [11] 许人冰, 1982, 南水北调与鲁西南环境。《中国环境科学》, 第1期。
- [12] 地质科学研究院情报研究所, 1976, 国外地质资料选编〔23〕, 国外地下水研究。

SIMULATION OF GROUNDWATER QUALITY  
AND PREDICTION OF ITS POLLUTION  
TREND IN JININ CITY, SHANDONG (Ⅲ)

Xu Renbin

(Sandong Bureau of Geology and Mineral Resources)

**Abstract**

In this paper, the last part of an experimental research report, the author presents the procedure for the adjustment and correction of the model of groundwater quality. With the finite element method, the groundwater levels and the concentrations of pollutants in several time intervals, calculated by a computer program according to the model, were fitted to the actually measured levels and concentrations until the absolute errors between the calculated and actual values were decreased to within the expected range; with the finite difference method, apart from the procedure mentioned above, the calculations of water budget and mass balance were also employed to hold the difference in the balance below certain limit. It is, thus, confirmed that the model developed is correct and reliable. On this basis, the author proposed five schemes for predicting the pollution trends of groundwater in terms of the possible situations in Jinin city by using both the finite element and finite difference methods for comparison with each other. Matters needed to pay attention to in the prediction of the pollution trend of groundwater in the future were noted.