

水力截获技术在治理地下水 石油污染中的应用

周念清

徐绍辉

(核工业第四勘察院, 石家庄 050021) (中科院南京土壤所, 南京 210008)

【摘要】 用数学模型模拟污染治理前石油类污染物在地下水中的运移,求得相应的水量模型和水质模型的参数。当水力截获带运行时,用新的监测资料对已建立的数学模型进行了检验和预报;水力截获技术不但可以去除地下水中的部分石油类污染物,而且还能防止已污染的高浓度水体的进一步扩散,起到了保护水源地的作用。

【关键词】 数学模型 水力截获技术 石油类污染物

【Abstract】 The migration of pollutants like oil in groundwater before treated is simulated by the mathematical model. The parameters of quantity and quality models for water are given. When hydraulic capture zone runs, the mathematical model having been established is examined and predicted by the new monitoring information. The technique can not only remove the some pollutants like petroleum, but also prevent the high contaminative water from further diffusion, and this plays an important role in protecting source

【Key words】 mathematical model hydraulic capture technique pollutants like oil

0 前言

大武水源地是淄博市张店、临淄和齐鲁石化公司约 50 万城市人口生活用水和全部工业用水以及近 10 万亩农田灌溉用水的主要来源。由于齐鲁石化公司三十万吨乙烯厂区位于大武水源地地下水的补给迳流带上,且厂区内土层厚度小,防污性能差,近几年来,因厂区污水排放管线、污水检查井、雨排系统、污水沟渠的渗漏和跑、冒等突发性事故的发生,使本来水质良好、水量大的特大型裂隙岩溶水源地受到不同程度的石油类污染物的污染,部分水质已不符合饮用水标准,并已威胁到整个大武水源地的使用,致使人民的生活及工农业生产受到影响。

目前,我国地下水污染防治工作还局限于对污染现状的监测和评价,至于对已污染的地下水进行治理方面的研究才刚刚起步。大武水源地污染程度重、污染分布范围广、地质及水文地质条件复杂、含水介质又是极不

均匀的裂隙岩溶含水层,加大了治理难度。本文介绍了大武水源地采用水力截获技术治理地下水石油污染,取得了明显的效果。

1 水力截获技术理论

1.1 基本原理及方法

水力截获技术是根据研究区的自然地理、地质和水文地质条件、污染物质以及分布情况,通过合理地布置取水构筑物,在含水层中进行适当的抽水,形成最佳的地下水人工流场,即在天然流场的基础上叠加一人工流场,改变地下水的水流模式,借助于地下水流状态的改变,有效地截获地下水中的污染物,从而去除部分污染物,防止污染面积的继续扩大和地下水的进一步恶化,达到控制和消除地下水中污染物的目的。

具体方法是在污染扩散带的下方布设截获井,抽取被污染了的地下水。其截获井数与间距由含水层的水文地质特征及污染状况等确定,截获带总宽度随污染带宽度而定,且

前者往往要比后者大一点。

1.2 截获带解析模式

截获带就是在含水层中一部分区域,布置一口或多口井,在某一时间段内将地下水抽出去。因此,截获带分析是地下水治理系统设计时应着重考虑的。

解析模型的导出需满足如下假设:含水层是均质各向同性、在水平方向上无限展布;均匀流(稳定态)条件占优势;承压含水层有一个相同的导水性,没有通过上下承压层的渗透;忽略承压含水层的贮水性和水动力弥散;垂直水力梯度也可忽略;抽水井是完整井,抽水量恒定。

用复势来描述通过含水层的流量势的分布。 $X-Y$ 平面上均匀区域流的复势为:

$$\Omega = -U_0 Z e^{-i\alpha} + C \quad (1)$$

而对于一口井的复势为:

$$\Omega = \frac{Q_w}{2\pi} \ln(Z - Z_w) + C \quad (2)$$

式中: U_0 ——均匀流的流速向量;

Z ——复势 $Z = x + iy$;

Z_w ——抽水井处的复势;

α —— X 轴和均匀流动方向的夹角;

Q_w ——抽水井的流量;

C ——与含水层底板相对应的常数,假定 $C=0$; i ——虚数, $i = \sqrt{-1}$

由于

$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha \quad (3)$$

$$U_0 = U_{x_0} + U_{y_0} = \frac{d\Phi}{dx} + \frac{d\Phi}{dy} \quad (4)$$

式中: U_{x_0} ——均匀流的 X 分量;

U_{y_0} ——均匀流的 y 分量;

Φ ——流量势对于承压含水层,流量势定义为: $\Phi = KBH$

式中: K ——水力传导率;

B ——承压含水层的厚度;

H ——水头

由于复势和所考虑的边界条件都是线性、齐次的,所以,根据叠加原理,复势的任何线性组合都可求出。不考虑井之间互相干扰

时,可把均匀流和井流的复势叠加,得到:

$$\Omega = \Phi + \Psi = -U_0 Z e^{-i\alpha} + \frac{Q_w}{2\pi} \ln(Z - Z_w) \quad (5)$$

式中: Ψ ——为流函数。

(5)式的实部和虚部分别为:

$$\begin{aligned} \Phi &= -U_0 [(X - X_w) \cos\alpha + (Y - Y_w) \sin\alpha] \\ &+ \\ &\frac{Q_w}{4\pi} [(X - X_w)^2 + (Y - Y_w)^2] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Psi &= -U_0 [(x - x_w) \sin\alpha + (y - y_w) \cos\alpha] \\ &+ \frac{Q_w}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{y - y_w}{x - x_w} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: x_w, y_w ——井处的 x 坐标和 y 坐标。

沿某一指定流线, x 方向和 y 方向的流速分量 v_x, v_y 分别为:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = \frac{1}{Bn} \frac{d\Phi}{dx} \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = \frac{1}{Bn} \frac{d\Phi}{dy} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: n ——孔隙度;

t ——从抽水开始的时间。

假设均匀流的方向和 x 轴方向一致,即 $\alpha=0$,那么可求得

$$dt = \frac{2\pi Bn}{Q_w} (y - y_w) \csc^2 \frac{2\pi}{Q_w} [\Psi - U_0 (y - y_w)] dy \quad (9)$$

积分后得

$$\begin{aligned} t &= \frac{Bn(y - y_w)}{U_0} \cot \frac{2\pi}{Q_w} [\Psi - U_0 (y - y_w)] + \\ &\frac{BnQ_w}{2\pi Q_0^2} + \ln \sin \frac{2\pi}{Q_w} [\Psi - U_0 (y - y_w)] + f(\Psi) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $f(\Psi)$ ——是一依赖于指定流线的常数。

方程(10)描述了水质点从某一指定点 (x, y) 坐标开始,沿流线达到抽水井的时间。抽水刚开始时,离抽水井最近的质点将立即被截获。即 $x = x_w, y = y_w$ 和 $t = 0$ 将是方程的一个解。于是可求得常数

$$f(\Psi) = -\frac{BnQ_w}{2\pi Q_0^2} \ln \sin \frac{2\pi}{Q_w} \Psi \quad (11)$$

将求得的 $f(\Psi)$ 代入公式(10)得

$$t = \frac{Bn(y-y_w)}{U_o} \cot \frac{2\pi}{Q_w} [\Psi - U_o(y-y_w)] + \frac{Bn}{2\pi Q_o^2} \ln \frac{\sin \frac{2\pi}{Q_w} [\Psi - U_o(y-y_w)]}{\sin \frac{2\pi}{Q_w} \Psi} \quad (12)$$

把(7)式代入(12)式得:

$$t = \frac{Bn(x-x_w)}{U_o} - \frac{BnQ_w}{2Q_o^2} \ln \frac{\sin \left[\frac{2\pi}{Q_w} U_o(y-y_w) + \theta \right]}{\sin \theta} \quad (13)$$

式中: $\theta = \tan^{-1}[(y-y_w)/(x-x_w)]$

引进三个无量纲参数:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{2\pi U_o}{Q_w}(x-x_w) \\ \bar{y} &= \frac{2\pi U_o}{Q_w}(y-y_w) \\ \bar{t} &= \frac{2\pi Q_o^2}{BnQ_w}t \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

1.3 单井稳定态(无限时间)的求解

对于单井,当抽水持续无限长时间,抽水达到稳定态,经一系列推导可求出抽水井到下游停滞点的距离 x_s 和分水岭流线方程分别为

$$x_s = \frac{Q_w}{2\pi U_o} \quad (15)$$

$$x = \frac{y}{\tan\left(\frac{2\pi U_o}{Q_w}y\right)} \quad (16)$$

停滞点、上游分水岭及分水岭流线见图1所示。

经迭代求解,可得出 $\bar{t}=1, 3, 5$ 和 ∞ 时的结果(见图2)。 $\bar{t}=\infty$ 的曲线与正常的地下水分水岭相对应。

以上是对一口井进行推导和计算的,而对于多口井,可以把上述计算方法用于每一口井并把所得的结果迭加起来,就可得其近似解。只要截获带不交叠,近似解应该是很好的。当井间距变小且截获带相交,近似解将更偏离准确解,只要井间距大于或等于 $Q/\pi U_o B$,用该计算方法所得结果是可以接受的。Javn(贾文)和 Tsang(特桑)在1986年研究了均匀流中布置相同流量的二口抽水井、

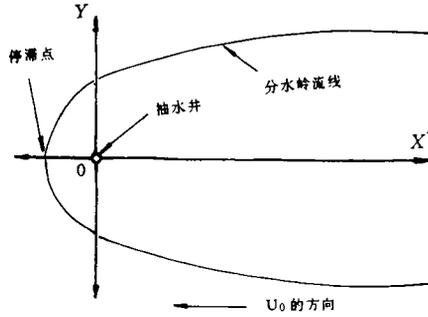


图1 停滞点、上游分水岭及分水岭流线图

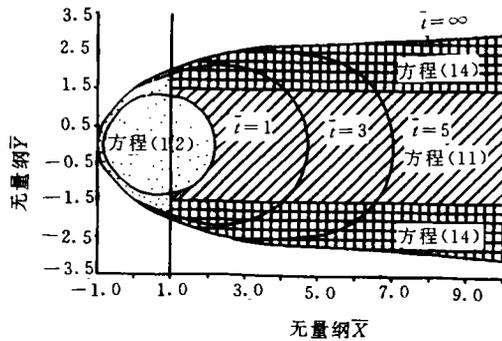


图2 $\bar{t}=1, 3, 5$ 和 ∞ 的截获带曲线

三口抽水井和四口抽水井的情况,只要井与井之间的距离分别不大于 $Q/2\pi U_o B$ 、和 $1.2Q/\pi U_o B$,就能防止污染物从井与井之间流过去,即污染物能被截获井所截住。

2 工程布置及初步运行结果

2.1 工程布置

根据研究区的水文地质条件和石油污染物的分布范围,确定水力截获带宽度。考虑到裂隙岩溶含水层的富水性大小、导水性强弱、抽水设备的抽水能力和水力截获带可能的影响范围,做到既经济又能最大限度地利用已有的取水构筑物及其它已有的设备,在污染源的下游设计了五口截获井,编号分别为 W-1、W-2、W-3、W-4、W-5,各井的间距见表1所示,满足理论推导的要求。其分布基本上垂直于地下水流运动的主方向,加上原有的一口位于污染源附近的井 W 共六口井,构成了水力截获带。截获井井深的确

定,取决于枯、丰水期地下水位变动带的大小、地下水中石油类污染物在垂直方向上的分布深度和含水层中裂隙、岩溶发育带的深度等。

2.2 初步运行结果

水力截获带各井从11月4日开始运行,运行前的初始等水位线如图3所示。水力截

获带运行时,井W-2因电力负荷过大,水泵未能启动,其余各井总的抽水量为 $26452\text{m}^3/\text{d}$,到11月30日,水力截获带停止运行,此时的地下水流场如图4所示。

水力截获带运行时各井的抽水量保持不变,其地下水位变化见表1。

表1 水力截获带运行前后截获井水位变化对比表

截获井	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W
抽水量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	4680	0	6912	4320	5740	4800
截获带井间距 d/m	485.58		184.40	208.71	230.85	
运行前水位 H/m	40.56	39.16	41.44	42.68	42.37	36.90
运行后水位 H_t/m	38.50	24.16	20.44	30.88	39.54	36.89

比较图3和图4可见,水力截获带运行后,地下水的水流模式已发生变化,以水力截获带为中心,形成一个新的地下水降落漏斗。

在水力带中的各井经过二十多天的运行后,地下水中石油污染物的含量与运行前分析结果对比见表2。

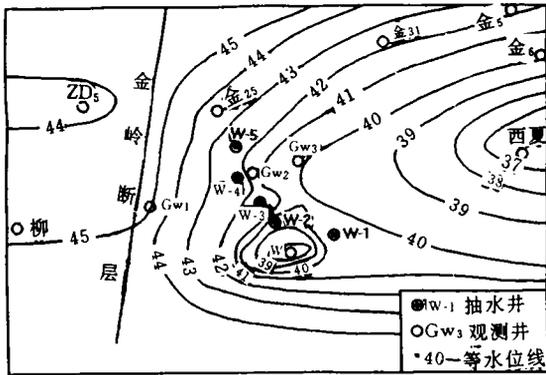


图3 水力截获带运行开始前地下水等水位线图

表2 水力截获带运行前后效果对比表 单位:mg/L

采样地点	运行前	运行后	采样地点	运行前	运行后
北焦宋村	0.26	0.17	墩1井	22.6	2.55
南焦宋村	0.66	0.39	东风宾馆	0.19	0.15
柳杭村西	0.29	0.14	临淄电厂	0.13	0.12
金-18	0.24	未检出	预制板厂	0.76	0.26
艾庄	0.22	0.13	五中	0.23	0.13

3 数学模拟及结果预测

3.1 数学模拟

受地形、地貌、地质构造、岩性、水动力条件等各方面因素的影响,研究区内各处的岩

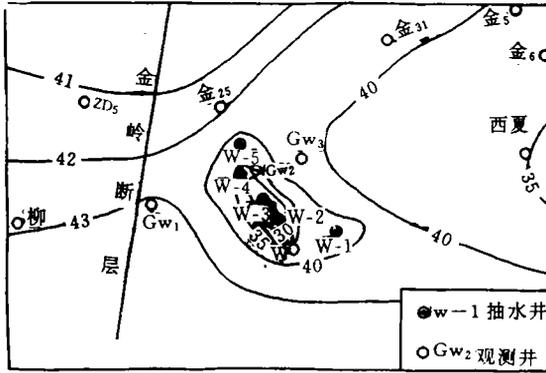


图4 水力截获带运行结束时地下水等水位线图

溶裂隙发育不同,含水层是非均质的。由于石油类污染物的运移包括对流和弥散二部分,而对流是和地下水的平均流速相关联的,所以,运移模型必须在水量模拟的基础上进行。研究区内裸露灰岩的面积很小,大气降水入渗补给可不予考虑,地下水的来源主要接受东、西、南部边界的侧向补给,以工业开采作为主要排泄方式。

根据地质条件,对计算区的边界进行概化,采用二维非均质渗流模型来描述计算区内地下水的运动。先建立水量模型,利用有限元进行计算,将整个计算区剖分为745个三

角形单元,401个结点,导水系数与贮水系数的分区一致,共分8个区。借助已有的资料,反演求得各区的导水系数和贮水系数,见表3。在水量模型的基础上建立石油污染物在裂隙岩溶含水介质中运移的数学模型,利用特

征有限元法来求解数学模型,经过反复模拟,最后求得各分区的纵向和横向弥散度,见表3所示。(有关水文地质参数计算的方法及过程在其它文章中有详细阐述,本文只引用了其中的结论)

表3 水文地质参数一览表

参 数 值 号	1	2	3	4	5	6	7	8
导水系数 $T/(m_2 \cdot d^{-1})$	1201	4516	2522	9537	9526	8527	8124	1255
贮水系数 S /无量纲	0.4500	0.0004	0.0013	0.0018	0.0021	0.0020	0.0014	0.4500
纵向弥散度 α_L/m	1.4	3.5	2.6	4.6	4.9	5.1	6.3	1.8
横向弥散度 α_T/m	0.012	0.031	0.023	0.042	0.046	0.048	0.061	0.015

为了对反演所求的弥散参数进行检验,选取1995年5月至1995年12月的石油污染物的分析资料及其它一些相关资料做正演计算,每二个月作为一个时段,结果表明:除个别点外,绝大部分取样点其计算值和分析值都是比较接近的,说明所建模型是可信的,能够用来预测水力截获带运行后,地下水中石油类污染物在各种情况下的变化趋势。

3.2 结果预测

(1)在齐鲁石化公司埃皋附近有污染源,使该处地下水中石油类污染物保持1995年的水平(最高值为18.0mg/L),让水力截获带运行,总抽水量为30964m³/d,在1995年的流场条件下,经过一、三、五年后,三个有代表性的取样点附近地下水中的石油污染物的含量变化见表4。

表4 石油污染物含量预报

单位:mg/L

预测地点	1995年检测值	不间断污染源			切断污染源		
		1年后	3年后	5年后	1年后	3年后	5年后
埃 皋	18.0	5.49	4.11	3.40	4.16	2.05	1.18
西夏水源地	0.16	0.14	0.12	0.10	0.14	0.12	0.10
东风水源地	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

从表中可以看出,在有污染源存在的情况下,即使水力截获带运行,也不能把地下水中的石油类污染物完全去除,但它可以控制污染物的进一步扩散。

(2)切断污染源后,仍以1995年的污染状况及流场为初始条件进行预报,其结果如表4所示。污染源切断后,借助于水力截获带,不但污染源附近地下水的质量逐渐得到改善,而且西夏水源地和东风水源地地下水的水质也将得到有效的控制。

水力截获技术虽然可以通过改变地下水运动的水流模式,有效地防止高浓度污染的水体进一步扩散,去除地下水中的部分石油

污染物,起到保护水源的作用,但不是直接治理地下水的污染,而且水力截获技术长期运行成本相对较高,从水力截获带抽出的被污染的地下水,如不进行治理和回收利用,就会造成水资源的很大浪费。

参 考 文 献

- 1 王秉忱,杨天行等编著.地下水污染—地下水水质模拟方法.北京:北京师范大学出版社,1985
- 2 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
- 3 孙訥正著.地下水污染—数学模型和数值方法.北京:地质出版社,1989

收稿日期:1997-08-19