

正常工况下石油类污染物运移及对地下水的污染分析

符明俊¹, 宁立波¹, 董少刚¹, 杨俊仓²

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050)

摘要 :以兰州市某原油储备库为例,建立符合实际情况的三维地下水流数值模型,应用危害最大化原则模拟该油库营运后未来 50 a 内地下水中污染物迁移情况。结果表明:在正常工况下,油类污染物质量浓度为 0.3 mg/L 的等值线临近黄河最快需 40 a,建立原油储备库不会对三滩水源地、黄河水质带来影响。

关键词 :污染预测;溶质运移;石油类污染物

中图分类号 :X820.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2010)02-0061-05

Study on oil contaminants transfer and pollution of groundwater under normal working conditions

FU Ming-jun¹, NING Li-bo¹, DONG Shao-gang¹, YANG Jun-cang²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Gansu Provincial Geological Environment Monitoring Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Using a crude oil reserve depot in Lanzhou as an example, a three-dimensional numerical model of groundwater was developed. The pattern of pollutant transportation in the groundwater after 50 years of operation of the crude oil reserve depot was simulated based on the maximized-hazard principle. The results show that the 0.3 mg/L isoline of oil contaminants will take 40 years to move from the crude oil reserve depot to the Yellow River, and the Santan water source and Yellow River will not be polluted under normal working conditions.

Key words: pollution forecast; solute transfer; oil contaminants

石油是国家经济的命脉。建设兰州某原油商品储备库,对促进地区经济发展和社会稳定具有重要意义。商业原油储备库拟建场地北面紧邻黄河,距三滩水源地位置较近,石油的滴漏或突发性事故的发生等都将对水源的安全构成威胁,进而影响兰州市的饮水安全。笔者对该油库建设运营后正常工况下石油类污染物(以下简称污染物)对地下水的污染情况进行定量评价,为原油储备库的建设和管理提供科学依据。所谓“正常工况”,这里指的是油库正常工作状态下只出现滴漏现象,不发生突发性泄漏事故。

1 水文地质概况

兰州盆地海拔在 1 520 ~ 2 500 m 左右,属温带半干旱气候,多年平均降水量为 317.6 mm。多年降水

明显具有周期性规律,其短周期为 4 a,长周期约为 8 ~ 11 a。降水年内分配不均,降水多集中于 7 ~ 9 月,其降水量占全年降水量的 56% ~ 70% 以上。多年平均蒸发量为 1 433 mm。

油库选址位于三滩的上游(图 1),研究区南部皋兰山等黄土丘陵为碎屑岩类孔隙裂隙水,主要含水层是沙砾岩层,其中有泥岩隔水层,补给条件差。黄河谷地为松散岩类孔隙水,主要含水层是沙砾卵石层,分布在黄河河漫滩和范家坪-雷坛河之间,沿岸富水性强。北部黄土丘陵及低中山为基岩裂隙水,富水性变化较大。地下水径流方向由南西向北东,主要接受上游地下径流、大气降水及河流补给,一部分排泄于黄河,另一部分潜流至崔家大滩水源地。排泄主要依靠人工开采和蒸腾作用。

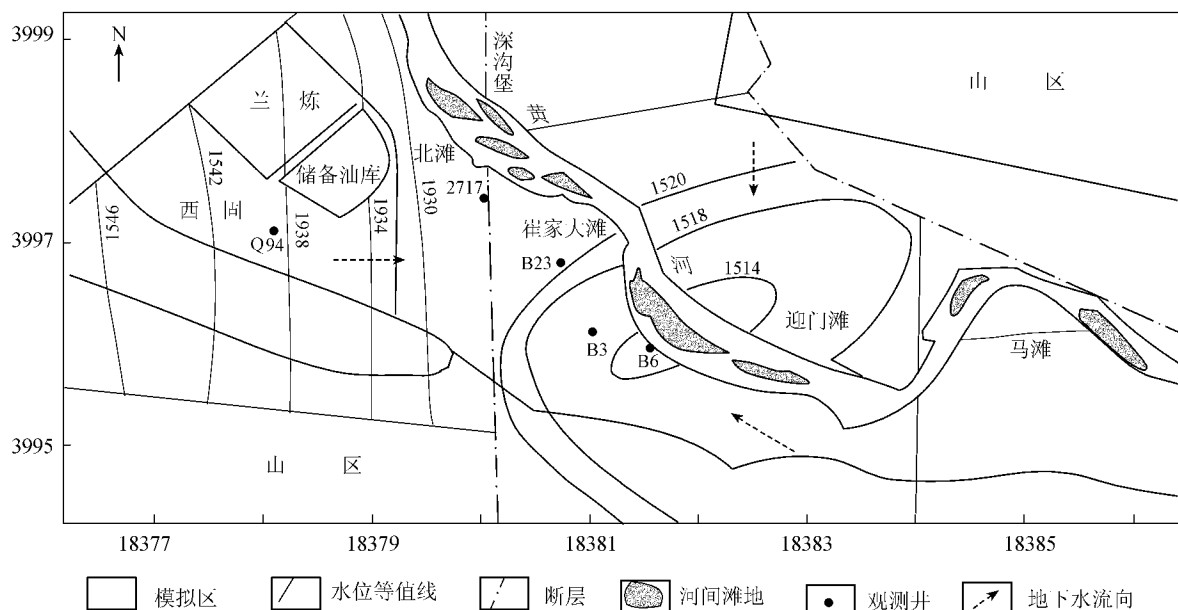


图1 研究区概况

2 研究区水文地质概念模型及边界条件

2.1 概念模型

研究区处于黄河Ⅰ级阶地上,面积约28 km²。地下水位埋深约3 m左右。油库东部为深沟堡断层,断层以西上部为4~6 m厚的粉细砂土,下部为5~15 m厚的砂卵石层。断层以东为三滩水源地的崔家大滩,上部为0~10 m厚的粉细砂土,下部为巨厚的砂卵石层。地下水基本流向为:深沟堡断层以西区域向东流动,崔家大滩水源地区向漏斗中心汇集,见图1。黄河在水源地区已经成为悬河,侧向补给地下水。研究区地下水系统可概化为三维非均质各向同性非稳定流地下水系统。

2.2 模拟区域边界条件的处理

本次模拟区域不是一个自然的水文地质单元,根据场流变化及地下水位随时间变化的特点分析,选择开采区域的外围,且根据地下水位的变化状态,模型的侧向边界条件设定在地下水位比较稳定的区域,均定为第一类边界条件。以自由潜水面为上边界,其边界条件由大气降水入渗、蒸发排泄、灌溉入渗和河流入渗等因素确定。底边界定为第二类边界条件,主要为盆地底部流体向上入渗量,数量很少。

3 数学模型及求解方法

3.1 地下水流数学模型

根据上述水文地质概念模型,将研究区地下水系统概化为三维非均质各向同性非稳定流地下水系统,其数学模型^[1-2]的表达式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \epsilon = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega, t > 0 \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = H_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t)|_{(x, y, z) \in B_1} = H_1(x, y, z, t) & (x, y, z) \in B_1, t > 0 \\ K \frac{\partial H}{\partial n} |_{(x, y, z) \in B_2} = q(x, y, z, t) & (x, y, z) \in B_2, t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为地下水水头; K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分别为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数; t 为时间; μ_s 为含水层给水度或比储水分数,第一含水层取重力给水度 μ_d ; H_0 为含水层初始水头; H_1 为各层边界水位; q 为含水层二类边界单位面积过水断面补给流量; ϵ 为源汇项强度(包括开采强度等); Ω 为渗流区域; B_1 为水头已知边界,第一类边界; B_2 为流量已知边界,第二类边界; n 为渗流区边界的单位外法线方向。

3.2 溶质运移数学模型

利用地下水水流模拟结果模拟饱和带中溶质运移,其数学模型^[1-2]表达式为:

$$\frac{\partial (\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (2)$$

式中: θ 为介质空隙度; C^k 为溶质 k 的浓度; x_i 、 x_j 为在直角坐标系下沿各方向上的距离; D_{ij} 为水动力弥散系数张量; v_i 为渗流速度; q_s 为单位体积含水层,给出或接受的流体的数量,代表源汇项; C_s^k 为源汇项中 k 的浓度; $\sum R_n$ 为化学反应项。

3.3 网格的剖分及求解方法

笔者运用 GMS 中 MAP、MODFLOW 和 MT3D 模块对研究区进行规则网格剖分及有限差分法求解^[3-5]。本次研究是小区域模拟,模拟精度要求较高。模拟区域在垂向上共分为 2 层,水平剖分网格 89 m×142 m,模拟区平面上分为 2 389 个网格。因此,整个模拟区被分为 4 778 个模拟单元,模拟区域三维剖分如图 2 所示。时间步长设为 30 d。西固地区和三滩水源地地层岩性、水文地质条件都比较简单,可以分为上、下两个含水层。上层是渗透性较差的粉细沙土,下层为导水能力较强的砂卵石层(以下简称上、下层)。

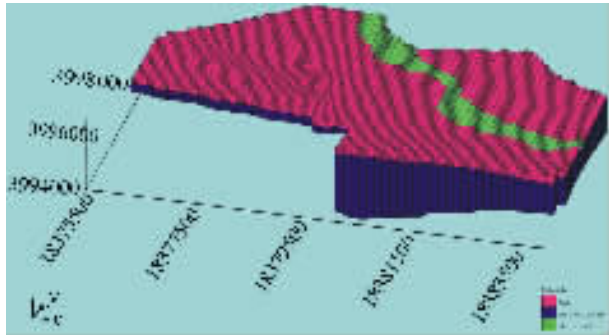


图 2 网格剖分三维图

4 弥散度的确定

获取弥散数据采用多井法,以氯化钠作为示踪剂。试验时间为 2008 年 2 月 1 日~3 月 16 日,连续 3 次投放,每次投放时间约为 30 min。然后,同时对主孔和观测孔进行取样并用硝酸银滴定法现场分析。投盐主孔第 3 次示踪试验氯离子浓度的变化情况见图 3、图 4。由图 3、图 4 可见,在观测孔主孔投放氯化钠后 160 min 左右,氯离子浓度出现变化(2 月 25 日 12 时),设此时为前锋到达的时刻,2 月 29 日 18 时 30 分观测井中氯离子质量浓度达到峰值 0.362 g/L。

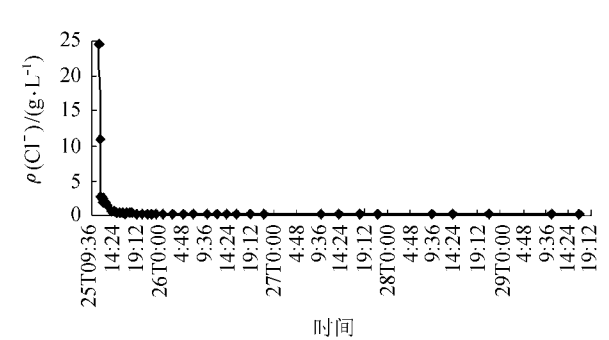


图 3 投盐孔 Cl⁻ 质量浓度随时间变化曲线

由于实验区地下水具有微承压性,井基本保持自西向东的稳定流动,因此应用一维流场中瞬时注

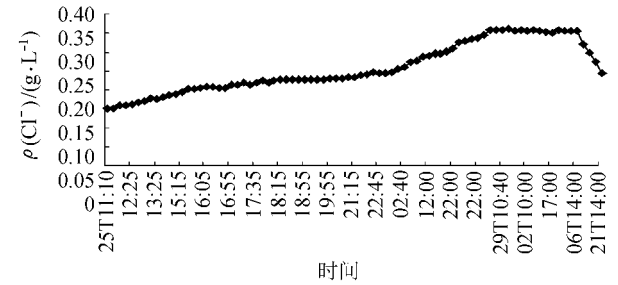


图 4 观测孔 Cl⁻ 质量浓度随时间变化曲线

入示踪剂的二维弥散解析模型求解弥散系数,其计算公式为

$$\alpha(x,y,z) = \frac{m/n'}{4\pi t \sqrt{D_L D_T}} \exp\left\{-\frac{(x-vt)^2}{4D_L vt} - \frac{y^2}{4D_T vt}\right\}$$
 (3)

若忽略分子扩散,并以 $D_L = \alpha_L v$, $D_T = \alpha_T v$ 代入解析式中得到

$$\alpha(x,y,z) = \frac{m/n'}{4\pi vt \sqrt{\alpha_L \alpha_T}} \exp\left\{-\frac{(x-vt)^2}{4\alpha_L v^2 t} - \frac{y^2}{4\alpha_T v^2 t}\right\}$$
 (4)

式中: C 为示踪剂浓度; v 为地下水实际平均流速; m 为单位厚度含水层中瞬时投放示踪剂的质量; n' 为含水层有效孔隙度; α_L 为纵向弥散度; α_T 为横向弥散度; D_L 为纵向弥散系数; D_T 为横向弥散系数。

式(4)为非线性方程,求解较困难,因此根据试验数据应用计算机程序求解 α_L 、 α_T ,弥散度计算结果见表 1。

表 1 水文地质参数和溶质运移参数

层次	给水度	渗透系数		有效孔隙度	西固弥散度/m		三滩弥散度/m	
		K_{xx}	K_{yy}		纵向	横向	纵向	横向
粉砂土层	0.14	0.2		0.17	0.08	0.03	0.8	0.03
砂卵石层	0.16	25		0.19	0.66	0.07	0.8	0.08

5 模型校正与识别

模型识别是通过反演计算模拟结果,对模型进行校正、反求和调试参数,以检验和提高模型的仿真性。为了保证所建立的数学模型能够反映实际流场的三维特点,用 2005 年 1 月份的观测水位作为初始水位,并不断重复调试、修正参数。由图 5、图 6 可以看出水位观测值与其计算值都基本落在允许的误差范围内,说明模拟识别期计算结果与研究区实际水位基本一致,符合实际水位地质条件流场^[6],模型可用于地下水污染状况预测。参数识别结果和溶质运移参数见表 1。模型校正和识别后,观测井 B6 和 Q94 的水位拟合结果如图 5、图 6 所示,井所在位置见图 1。

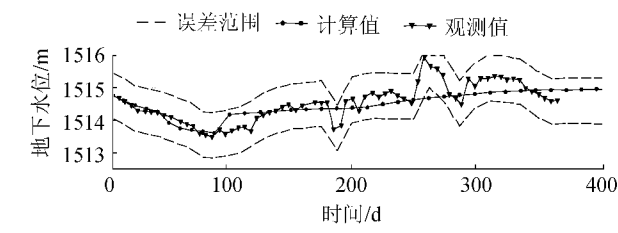


图 5 观测井 B6 水位拟合

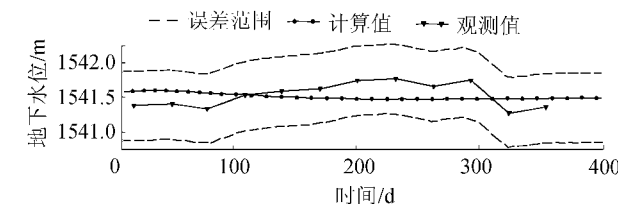


图 6 观测井 Q94 水位拟合

6 正常工况下污染物在地下水中的迁移

6.1 通量边界条件

在模拟污染物在饱和带的迁移时,对补给源做一定的处理。假设在两个月的时间内(2015-01-01~2015-03-01),以非正常工况下非饱和带下边界定浓度通量边界的污染物最大质量浓度 $500\text{ mg/L}^{[7]}$ 作为饱和带上边界定浓度通量边界,持续补给地下水,其浓度随时间变化规律如图 7 所示。

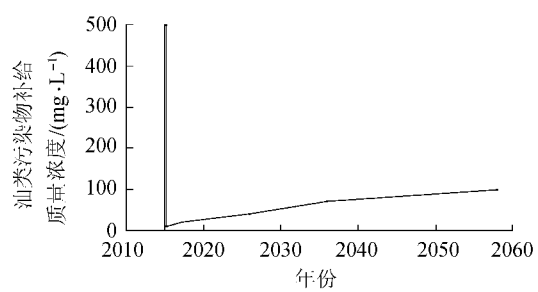


图 7 地下水中油类污染物的补给浓度随时间的变化规律

6.2 模拟结果与分析

6.2.1 模拟结果

在正常工况下模拟污染物在饱和带中的迁移距离、范围及浓度在上、下层中的变化见图 8,其主要展示了正常工况下历时 30 a、50 a 内污染物质量浓度为 $0.3\text{ mg/L}^{[8]}$ 等值线(以下简称等值线)迁移范围。

6.2.2 模拟结果分析

模拟过程中秉承污染最大化、危害最大化的原则,在模拟中忽略吸附解吸等因素,所以模拟结果在此种工况下可能出现的最大危害情况,通过模拟计算得出不同时间段的污染物迁移距离、范围及浓度。除了井 Q94 在库区的西南面外,井 2717、B23、B3 和 B6 位于库区以东、东南面(见图 1)。根据模拟结果可知:

a. 由模拟污染物扩散等值线图(图 8)显示,在地下水水流场控制作用下污染物主要向东迁移,直接

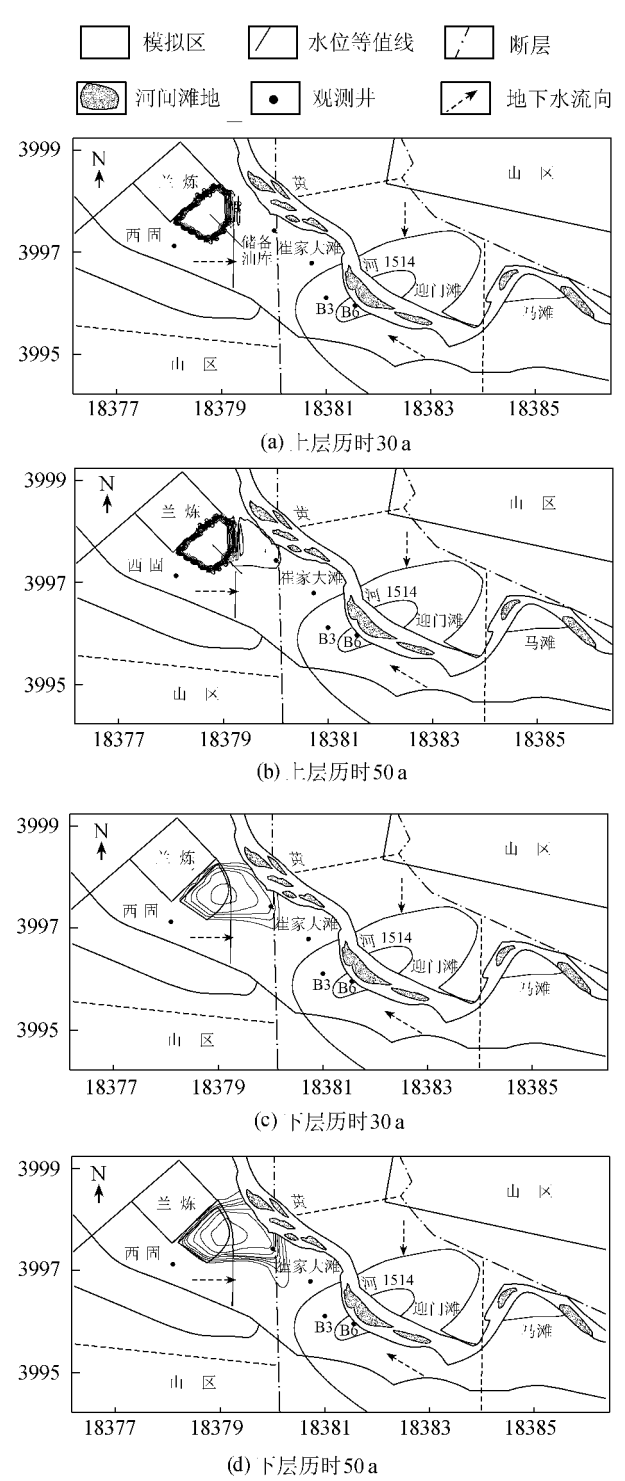


图 8 污染物迁移范围

威胁黄河和崔家大滩水源地。根据文献[8]的规定,饮用水受石油类污染的浓度对模拟结果分析:历时 10 a,库区内只有上层出现污染物;历时 50 a,等值线在上、下层的迁移距离分别为 850 m、1 530 m,显然污染物在下层迁移的平均速度约是上层的 1.8 倍。

b. 图 9 中上层的 10~20 a 间和下层 30~40 a 间出现速度突变(虚线所圈部分)结合模拟结果得出:等值线接近黄河岸时,由于河漫滩富水性强和水力传导系数大,该等值线临近黄河最快需 40 a。

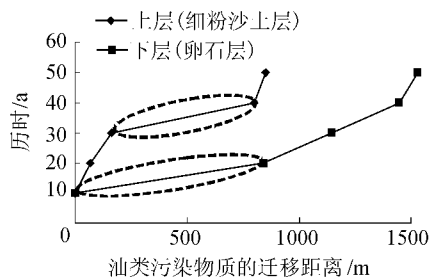
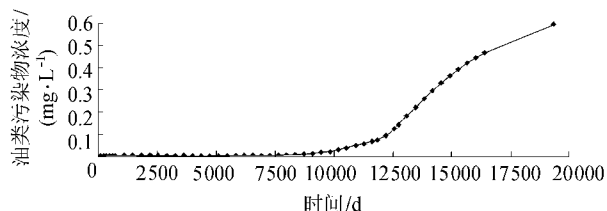
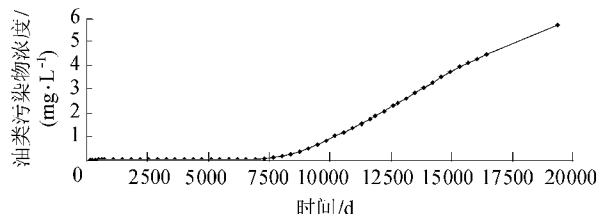


图9 上、下层油类污染物迁移的距离对比

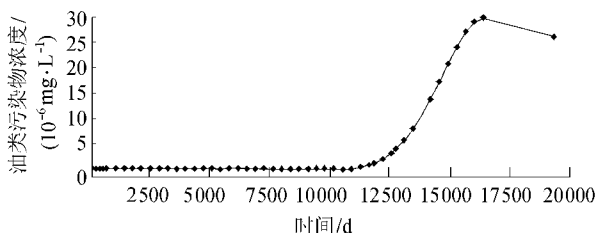
c. 不同层次、相同时间内,观测井中污染物浓度有很大差异,见图10。历经50a,正常工况下井2717和井B23污染物在上层的质量浓度分别为0.600 mg/L、0.00003 mg/L,而在下层的质量浓度分别为7.000 mg/L、0.003 50 mg/L。污染物浓度在层次上的差异主要与岩性、孔隙度等有关,而井间同层位的浓度差异还与迁移距离有关。显然历时50a,观测井2717将受到较大影响,而B23将受到轻微的影响。



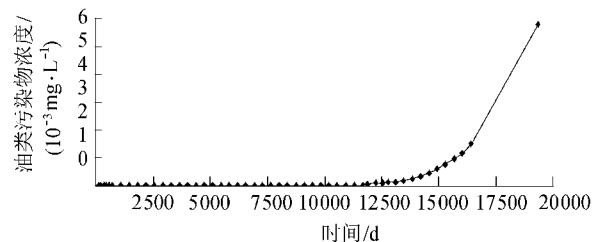
(a)观测井2717上层



(b)观测井2717下层



(c)观测井B23上层



(d)观测井B23下层

图10 观测井2717、B23所在地上下层污染物浓度变化

d. 50a内,库区地下水中污染物浓度持续升高。正常工况下上层污染物质量浓度为45 mg/L,而

下层中质量浓度为17.5 mg/L,上层受到污染程度是下层的2.57倍。

7 结论与建议

a. 正常工况下,地下水流场控制作用下污染物主要向东扩展,因此东部观测井都受到不同程度的污染,而西、南部地下水水质基本没有影响。由于黄河流量大,地下水排泄对黄河水质不会有明显影响。

b. 正常工况下,该油库基本不会对崔家大滩水源地水质造成影响。但为了确保城市地下水供水水源安全,必须对库区及北、东两个方向的地下水进行长期监测,建议建设部门采取一些工程措施和处理措施。例如,建设配套的废水处理工程,完善排污下水管道系统,在研究区一定范围内建设各种防渗工程等。

参考文献:

- [1] 陈崇希,唐仲华.地下水问题数值方法[M].北京:中国地质大学出版社,1990:1-4.
- [2] 薛禹群.地下水动力学[M].2版.北京:地质出版社,1997:115-116.
- [3] 丁继红,周德亮,马生忠.国外地下水模拟软件的发展现状与趋势[J].勘察科学技术,2000(1):31-42.
- [4] 刘苑,武晓峰.地下水中污染物运移过程数值模拟算法的比较[J].环境工程学报,2008,2(2):229-234.
- [5] 詹红丽,张展羽,王南海,等.区水环境治理规划及地下水溶质运移预测模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):522-525.
- [6] 林丽蓉,唐仲华.地下水及溶质运移数值模拟系统[J].地质科技情报,2003,22(2):103-106.
- [7] 杨仓俊,宁立波,董少刚,等.兰州商业原油储备库地下水环境质量现状调查、监测与评价报告[R].武汉:中国地质大学,2008.
- [8] GB 5749—1985,国家生活饮用水水质参考指标及限值[S].

(收稿日期:2009-03-24 编辑:徐娟)

