

# 基于 Visual Modflow 的某油库地下水污染模拟

高策<sup>1,2</sup>, 严婷<sup>1,2</sup>, 葛佳亮<sup>1,2</sup>, 高小文<sup>1,2</sup>, 苏承建<sup>3</sup>

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国建材地勘中心甘肃总队, 甘肃 天水 741000)

**摘要:** [目的] 对陕西省黄陵县某油库地下水污染状况进行模拟, 为油库区地下水污染的辅助预测和防治提供科学指导。[方法] 通过野外调查试验获得初始参数, 应用 Visual Modflow 软件建立了地下水水流模型, 进行模型识别验证, 获得最终水文地质参数。耦合水流方程与污染物迁移方程, 得到地下水溶质运移模型。[结果] 模拟了两种假设情形下运移情况: 正常工况和油罐漏油。数值模拟预测了污染的范围和程度。到预测时间 20 a, 污染物影响范围最大。[结论] 污染物主要沿水流方向运移, 对水环境的影响随时间逐渐增大, 污染浓度随距离增大而减小; 两种情况下, 油罐漏油时对水环境造成的影响更加恶劣, 污染范围远超出油库区。

**关键词:** 油库; VisualModflow; 溶质运移; 地下水污染模拟

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)04-0179-05

中图分类号: X523

**文献参数:** 高策, 严婷, 葛佳亮, 等. 基于 Visual Modflow 的某油库地下水污染模拟[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 179-183. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 04. 030; Gao Ce, Yan Ting, Ge Jialiang, et al. Numerical simulation of groundwater pollution of an oil depot based on Visual Modflow[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 179-183. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 04. 030

## Numerical Simulation of Groundwater Pollution of an Oil Depot Based on Visual Modflow

GAO Ce<sup>1,2</sup>, YAN Ting<sup>1,2</sup>, GE Jialiang<sup>1,2</sup>, GAO Xiaowen<sup>1,2</sup>, SU Chengjian<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

3. Geological Exploration in the Chinese Building Materials Center Team in Gansu Province, Tianshui, Gansu 741000, China)

**Abstract:** [Objective] The groundwater pollution status of a depot in Huangling County of Shaanxi Province were simulated to provide scientific guidance for auxiliary prediction and prevention of groundwater pollution in oil depot area. [Methods] Based on the initial parameters obtained through field investigation, we established a groundwater flow model using Visual Modflow software. Then through model identification and verification, we obtained the final hydrogeological parameters. And we derived a groundwater solute transport model in reference to water flow equation and contaminant transport equation. [Results] We simulated two hypothetical scenarios: one is under normal working condition and another one is when oil leakage happened for the oil tank. The range and degree of pollution were predicted by numerical simulation. The impact of pollutants was predicted that it would become the greatest in the following 20th year of leakage. [Conclusion] The results obviously showed that the contaminant transport mainly via flow direction, the impact on water environment tends to gradually increase with time going on. And there was a negative correlation between the concentration of pollution and the distance from oil tank. Oil tank leakage will cause more severe pollution to the water environment than normal operation can do, under that case, pollution is far beyond the scope of the depot area.

**Keywords:** oil depot; Visual Modflow; solute transport pollution; pollution simulation of groundwater

石油是中国社会发展的重要资源,随着经济的发展,越来越多的单位需要建设储油罐来满足对石油的需求。油库在使用过程中可能产生跑冒滴漏,可能发生爆炸、泄露和溢出等,这些污染物进入土壤后可能逐渐被下渗水或地下水流所溶解。地下水遭到污染后,污染源被控制后想要自然复原需要上百年时间<sup>[1]</sup>。故对迁移规律进行定量分析,对于加强油库污染物的监测和管理,以及保护油库区水环境意义重大。国内外已有很多人通过 Visual Modflow 软件数值模拟研究地下水污染模拟。徐铁兵等<sup>[2]</sup>模拟了迁安市地下水中六价铬浓度变化。常颖<sup>[3]</sup>利用 Visual Modflow 对大连石化行业地下水污染进行了模拟与风险预测。马志飞<sup>[4]</sup>以华东某废物填埋场为研究对象,对污染羽阻隔效果进行模拟预测。吴昌将<sup>[5]</sup>建立数值模拟模型研究了呼和浩特市浅层地下水污染物运移与扩散。国外学者 Seyed R Saghravani 等<sup>[6]</sup>做试验模拟了承压含水层中磷元素的迁移并通过数值模拟软件分析。本研究将黄陵县某油库作为研究区并进行合理概化,在水流模型的基础上建立溶质运移模型,模拟预测了正常状况和油罐漏油两种情况下石油类污染物的运移情况。模拟结果用于油库区地下水污染的辅助预测,为防治工作提供科学指导。

## 1 研究区概况

油库位于黄陵县店头镇距镇中心约 2.4 km,油库处为河谷地形,自然标高约 920~940 m,划分河谷区与丘陵区,沿分界线确定研究区。研究区水文地质单元相对完整,主要地表水流沮河,是一条常年性河流,属于北洛河一级支流,径流由西向东,流经油库区东侧。研究区地下水主要有第四系冲积砂砾石层孔隙水,潜水的主要来源有大气降水、河水及地表水体的渗入和基岩裂隙水的补给等,含水层上部为第四系冲积砂、卵、砾石,结构松散,磨圆和分选性较好,孔隙率大,透水性较强,赋水性好。由于不同河段含水层

的厚度、透水性及补给条件的不同,其富水性亦有明显的差异<sup>[7]</sup>。研究区地下水主要来源有大气降水、河水和基岩裂隙水的补给等,主要通过径流向沮河排泄,或向下游潜流排泄<sup>[7]</sup>。研究区主要出露岩层为第四系冲击砂砾卵石层,厚度为 7.5~11.5 m。各个岩土层自上而下分别为第四系人工杂填土层( $Q_{ml}$ , 2.2~5.4 m)、第四系粉土( $Q_{col}$ , 2~4.8 m)、第四系圆砾( $Q_{al+pl}$ , 1.1~3.3 m)、侏罗系强风化泥岩(0.9~1.7 m)、侏罗系中风化泥岩(2.6~7 m)。区内地下水赋存于第四系冲积砂砾石孔隙含水层,水量中等,水位埋深 4.9~8 m,分布宽度一般 50~300 m,含水层厚度 12.5 m,绝对标高 910~950 m。渗透性主要取决于含水介质的粒度及泥质含量的高低,粒度粗,泥质含量低,透水性强,反之透水性弱,总矿化度小于 1 g/L,该地下水类型为  $HCO_3$ -Ca,  $HCO_3$ -Mg 型水,水质普遍较好<sup>[7]</sup>。

## 2 模型介绍和应用

### 2.1 概念模型

模拟区范围主要为黄陵县店头镇沟谷汇流区域。平面面积 3.1 km<sup>2</sup>,底板埋深 8~35 m。根据前述的地质水文地质条件,区内主要含水层为新生界第四系冲洪积砂砾石孔隙含水层。考虑到本研究主要为模拟污染物在地下水中的迁移,对地下水天然流动形态扰动小,可将模拟区内上游沟谷流入模拟区部分概化为定水头边界;下游流出模拟区部分可概化为定水头边界;模拟区周边边界均为各沟谷的分水岭,可概化为第 2 类零流量边界;考虑到侏罗系砂泥岩结构致密、透水性差的特点,模拟区底部边界可概化为隔水底板。模拟区顶部边界发生着大气降水入渗补给、潜水蒸发排泄等,可将其概化为自由边界。

### 2.2 水流模型

区内地下水运动符合达西定律,地下水的稳定流运动问题可用下述的二维渗流数学模型来描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h-B) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K(h-B) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + W = 0 & [(x, y) \in \Omega] \\ h | A_1 = h_1 & (\text{上游定水头边界}) \\ h | A_2 = h_2 & (\text{下游定水头边界}) \\ -K \frac{\partial h}{\partial n} | A_3, A_4, A_5 = 0 & (\text{第二类零流量边界}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H$ ——潜水水位(m); $K$ ——渗透系数(m/d); $W$ ——降水入渗补给强度(m<sup>2</sup>/d); $\Omega$ ——模拟区; $A_1$ ——西北部定水头边界面; $A_2$ ——模拟区东南部定水头边界面; $A_3$ ——模拟区西部零流量边界面; $A_4$ ——模拟区东部零流量边界面; $A_5$ ——隔水底板

边界; $B$ ——底板标高(m); $n$ ——各边界面的外法线方向。

可用有限差分法求解该渗流数学模型。有限差分是将时间和空间进行离散化<sup>[8-9]</sup>。其中在水平面上采用间距为 10 m 等间距正交网格将模拟区划分为

470,340 列。垂向上剖分为 1 层,对应实际中的第四系冲积砂砾卵石孔隙含水层。通过上述的剖分,共剖分出了 159 800 个单元,其中活动单元 31 010 个,代表平面实际面积 3.1 km<sup>2</sup>。

### 2.3 模型识别

根据水文地质条件,将潜水含水层划分为漫滩、阶地 2 个参数分区。2016 年 7 月 20 日通过区域环境水文地质调查得出数据,结合岩性特征和经验值,拟定水文地质参数初始值,模型识别后,最终确定水文地质参数,代入模型模拟计算稳定流,得到地下水稳定流场(图略),三维地下水流向(图略),分析流场形态可知,区内地下水在接受降水入渗补给后总体由西北向东南流动,与区域地下水流动特征基本一致。

表 1 计算地下水位与实测地下水位对比 m

观测井号	实测水位	计算水位	误差
ZK <sub>1</sub>	920.713	921.094 7	0.288 7
ZK <sub>2</sub>	915.874	920.388 2	0.652 2
ZK <sub>3</sub>	919.206	920.996 4	0.043 4
ZK <sub>4</sub>	921.397	921.098 7	-0.298 3
J <sub>1</sub>	917.635	917.961 3	0.326 3
J <sub>2</sub>	912.113	913.006 2	0.893 2
J <sub>3</sub>	911.074	911.500 5	0.426 5
J <sub>4</sub>	911.436	911.686 5	0.250 5

对比模型计算地下水位与钻孔、井点实测地下水位表明(表 1),两者基本一致,最大误差为 0.89 m,基本满足模型精度要求。

### 2.4 溶质运移模型

描述污染物在地下水中的迁移,前提是不考虑其在含水层中的交换、吸附以及生物化学反应等作用,溶质运移的数学模型为:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( n D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (n C V_i) - C' W \quad (2)$$

$$D_{ij} = \alpha_{ijmn} = \frac{V_m V_n}{|V|} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{ijmn}$ ——弥散度(m);  $V_m V_n$ —— $m$  和  $n$  方向上的速度分量(m/d);  $C$ ——污染物的浓度(mg/L);  $n$ ——有效孔隙率;  $X_i$  坐标变量(m);  $t$ ——时间(d);  $C'$ ——源汇项中污染物的浓度(mg/L);  $W$ ——面状源汇项强度[m<sup>3</sup>/(d·m<sup>2</sup>)];  $V_i$ ——渗流速度(m/d)。

研究区参数分区图如图 1 所示。经模型识别后,考虑到污染泄漏点距下游最近的保护目标的距离约为 400 m,故确定此次模拟区范围为 0~1 000 m,对应的纵向弥散度应介于 1~30,从保守角度考虑,本次模拟弥散度参数取值详见表 2。

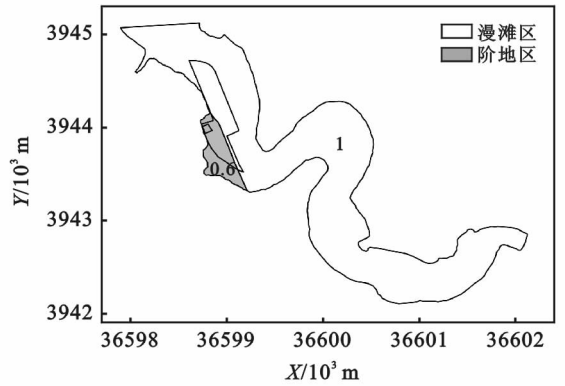


图 1 模拟区渗透系数分区

表 2 模拟区水文地质参数

分区	渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )	给水度	弹性释水率/(1·m <sup>-1</sup> )	纵向弥散度/m
漫滩区	1	0.1	1.0 e-5	10
阶地区	0.6	0.1	1.0 e-5	10

溶质运移模型的范围和边界位置与水流模型一致。监测单位在 2016 年 7 月 23—24 日连续两天对油库区地下水数据实测,监测点位置(表 3),共 5 个,其中油库西北测点为泉点。每天采样 1 次,确定特征污染物的浓度。忽略温度与水密度变化对水动力场和浓度场的影响,同时保守考虑模型中各项参数,假设污染源为面源连续注入,运用 Visual Modflow 软件中 MT3 DMS 模块研究污染物运移模拟。

表 3 地下水监测点设置

编号	地点	直角坐标/m		水位埋深/m	井深/m
		X	Y		
G <sub>1</sub>	油库西北	36 598 416	3 944 015	—	—
G <sub>2</sub>	厂区	36 598 805	3944 012	6.92	16.2
G <sub>3</sub>	厂区	36 598 766	3943921	6.74	14.5
G <sub>4</sub>	厂区	36 598 832	3943942	6.84	12.4
G <sub>5</sub>	厂区	36 598 967	3943949	4.62	15

## 3 污染物模拟预测

通过对油库的工程分析,油库区主要潜在污染源为柴油、汽油。选择石油类作为特征污染物。油库使用过程中污染物影响地下水可能包括以下 2 种情况。情况 1,正常状况下不会因卸油发生油品泄漏,也不会发生管道腐蚀和泄漏,在一定允许范围内,合理考虑因油罐车冲洗而随水流入渗到含水层中的油品。在情况 2 下,柴油或汽油通过漫溢、泄漏方式渗入地下水,使地下水环境受到污染。根据入渗面积、多年平均降水量,雨水和生产用水入渗系数,油品的平均密度等,计算得出两种情况下污染物的源强(表 4)。两种情况下污染物影响时间均为 20 a,影响含水层均为第四系孔隙水含水层。

表 4 两种情况污染源浓度

情景设定	泄漏速率	特征污染物	污染物浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	含水层
正常状况	连续源强 (56.3 L/d)	石油类	1.42	潜水
非正常状况	连续源强 (56.3 L/d)	石油类	142	潜水

注: \* 参考地表水标准。

参照《地下水质量标准(GB/T14848-93)》,以Ⅲ类标准作为超标限,通过数值模拟,得到油库在情况1各特征污染物的影响范围、超标范围和最大运移距离如表5,图2所示。情况1下,第100 d、第365 d地下水中石油类浓度未达到检出限。从预测结果可以

看出,在正常状况下,地下水中石油类浓度在1 000 d后没有超出地下水质量Ⅲ类水标准,影响范围为773  $\text{m}^2$ ,此时没有运移出油库范围;在3 650 d后浓度没有超出地下水质量Ⅲ类水标准,影响范围为6 943  $\text{m}^2$ ,最大运移距离为21 m;在7 300 d后超出地下水质量Ⅲ类水标准的范围为106  $\text{m}^2$ ,影响范围为13 341  $\text{m}^2$ ,最大运移距离为36 m。

表 5 情况 1 的石油类污染物预测结果

预测时间/d	影响范围/ $\text{m}^2$	超标范围/ $\text{m}^2$	最大运移 距离/m
1 000	773	0	0
3 650	6 943	0	21
7 300	13 341	106	36

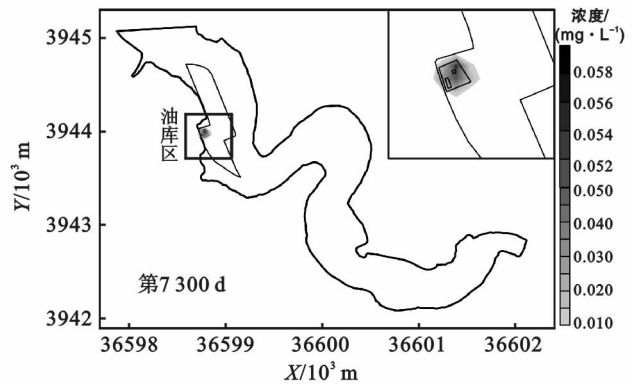
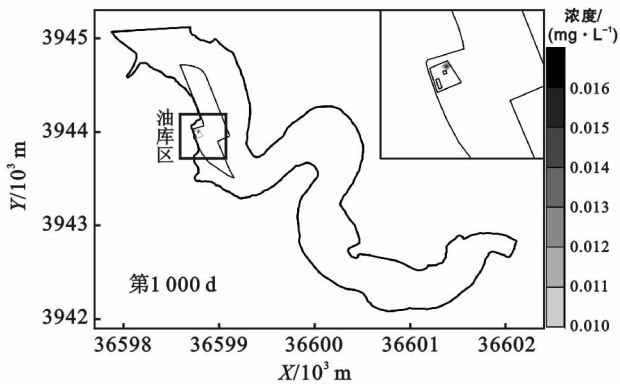


图 2 情况 1 下石油类污染物的运移

柴油库或汽油库输油管道腐蚀或老化等情况而发生油品泄漏时,石油类污染物的影响范围、超标范围以及最大运移距离如表6和图3所示。从预测结果可以看出,情况2下,地下水中石油类在100 d后超出地下水质量Ⅲ类水标准范围为594  $\text{m}^2$ ,影响范围为6 120  $\text{m}^2$ ,最大运移距离为19 m。泄漏发生365 d后地下水中石油类超出地下水质量Ⅲ类水标准的范围为587  $\text{m}^2$ ,影响范围为6 166  $\text{m}^2$ ,最大运移距

离为21 m。泄漏发生1 000 d后,地下水中石油类污染物超标范围为345  $\text{m}^2$ ,影响范围为8 259  $\text{m}^2$ ,最大运移距离为46 m。泄漏发生3 650 d后,地下水石油类超出地下水质量Ⅲ类水标准范围为0.15  $\text{m}^2$ ,影响范围为10 427  $\text{m}^2$ ,最大运移距离为64 m。事故发生7 300 d后,地下水石油类没有超出地下水质量Ⅲ类水标准范围,影响范围为12 512  $\text{m}^2$ ,最大运移距离为99 m。

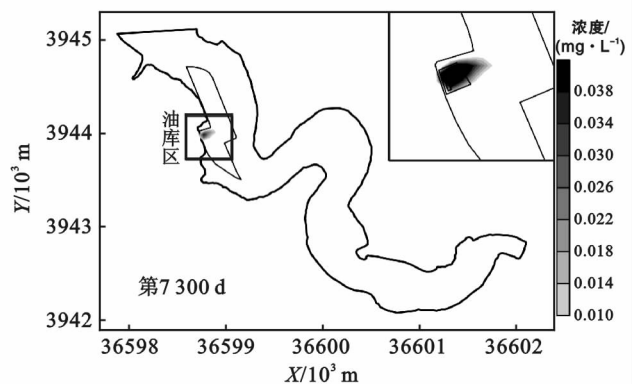
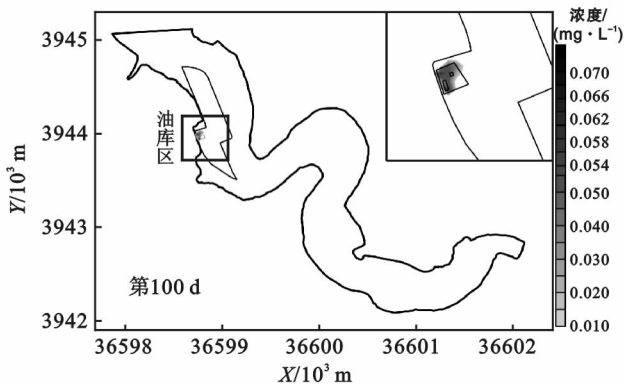


图 3 情况 2 下石油类污染物的运移

油品发生泄漏 90 d 后得到控制,随着时间推移,地下水中石油类影响范围随时间增大,但超标浓度越来越小。以上非正常状况发生的概率较小,在实施了严格的监测计划、防渗措施和应急措施后,可有效降低影响范围,将其影响程度降至环境可接受范围。

由图 2 和图 3 可以看出,随着模型持续运行,污染浓度和面积逐渐增大,当时间达到预测时间 20 a 时,污染物的超标浓度和范围达到最大,且影响范围一直扩大。情况 1,污染物由油库中心向四周扩散,影响范围占满油库库区;情况 2,污染物的源强较情况 1 大,主要向东扩散,20 a 后,污染物的影响范围已大幅超过油库库区。

表 6 情况 2 的石油类污染物的预测结果

预测时间/ d	影响范围/ m <sup>2</sup>	超标范围/ m <sup>2</sup>	最大运移 距离/m
100	6 120	594	19
1 000	8 259	345	46
7 300	12 512	0	99

## 4 结论

本研究的油库区位于陕西省黄陵县,概化模型条件,建立水文地质概念模型并用 Visual Modflow 逼真地模拟和刻画。然后利用观测水位和研究区地下水运动规律,对模型识别校正。最后设计了正常使用和油库漏油 2 种情况,把石油类作为污染源强计算的特征污染物,并将地下水渗流数值模型与污染物迁移方程耦合,得到地下水溶质运移模型,用此模型来分析 2 种不同污染情况。

模型钻孔的观测水位和计算水位拟合较好。由预测结果可知,污染物沿水流方向运移。情况 1 下污染物从油库中心向四周扩散;情况 2 污染向东扩散,超标范围小,且逐渐稀释浓度降低。在情况 2 下,7 300 d 泄漏地下水中石油类污染物的扩散面积超过

12 000 m<sup>2</sup>,最大运移距离 99 m;第 100,365,1 000 d 石油类污染物的超标范围都超出 340 m<sup>2</sup>。随着时间推移,一定范围内石油类污染物的浓度逐渐升高,污染面积逐渐扩大,当达到预测时间 20 a 时,污染物的影响范围和距离达到最大。由于岩土阻滞和水流稀释,随着时间的推移,虽然污染物运移范围在扩大,但其浓度却随着运移距离的增加而减小。对比两种情况下污染物的影响范围、超标范围和最大运移距离等可知,漏油后污染远比之前恶劣,但随距离增大污染浓度减小。实施防渗措施并严格监测,可将其降至环境可接受范围,可知下游受污染危险小。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 弓永峰. 地下水石油污染模拟及防治措施研究[D]. 陕西西安:长安大学,2010.
- [2] 谢世杰,张强,冯浩然. 迁安某矿区尾矿库地下水氟化物迁移模拟预测[J]. 甘肃水利水电技术,2013(3):4-6.
- [3] 常颖. 沿海石化行业典型地下水污染数值模拟研究[D]. 辽宁大连:大连理工大学,2014.
- [4] 马志飞,安达,姜永海,等. 某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟[J]. 环境科学,2012(1):64-70.
- [5] 吴昌将. 基于 Visual Modflow 的呼和浩特地下水硝酸盐污染数值模拟研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古工业大学,2010.
- [6] Saghravani S R, Sa & Apos M, Shaharin I, et al. Simulation of Phosphorus Movement in Unconfined Aquifer by Means of Visual MODFLOW[J]. Journal of Computer Science, 2010, 6(4):446-449.
- [7] 杨少辉. 黄土丘陵区地质灾害发育特征及规律研究[D]. 陕西西安:长安大学,2010.
- [8] 薛禹群,谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [9] Modflow W H A. The U S geological survey modular ground-water model-the ground-water flow process: U S Geological Survey Techniques and Methods6-A16, variously[M]. Reston, Virginia: U S Geological Survey, 2005.