

基于 GMS 的油品泄漏污染模拟及处理措施*

王青宽¹ 梁亮² 陈晨¹ 杨憬轶³ 李薇¹ 龚奕彰¹ 赵杰³

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院; 2. 中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司; 3. 中石油管道有限责任公司西部分公司)

摘 要 研究采用地下水模拟软件(GMS)进行了穿越地下含水层的输油管道泄漏时油品在地下水中的扩散和迁移过程。在模拟出预期的地下流场后,采用溶质迁移模块进行扩散模拟,并成功预测了在特定时期的污染情形和浓度分布。泄漏油品的迁移路径与地下水流动方向基本一致,并且在第 1 700 d 左右将会汇入最近的河流中造成更大的危害。结合模拟结果和现有的防治措施,分别作了防渗墙和抽出处理的情景模拟,结果显示防渗墙将推迟污染物进入河流的时间,而设置抽水井可以有效处理地下水石油污染。

关键词 地下水; 石油泄漏; 污染模拟; 处理措施

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2018.05.004

文章编号: 1005-3158(2018)05-0012-05

0 引 言

地下水以其稳定的供水条件、良好的水质,成为农业灌溉、工矿企业以及城市生活用水的重要水源^[1]。输油管道作为石油的主要输送工具之一,虽然效率高、成本低,但容易遭受管道腐蚀、管线老化、地质灾害、及运行管理等众多因素的影响,从而出现油品泄漏的事故。泄漏油品会随着地下水的流场迅速扩散,可能造成严重的水质污染及生态破坏。同时,由于大多数管线分布区域很广,铺设路程很长,极有可能经过自然保护区和地下水源地等重要区域,倘若发生泄漏事故,其后果不堪设想,需要采取及时有效的处理措施^[2]。合理利用地下水数值模拟等软件对泄漏油品在地下水中的迁移和扩散开展模拟研究,对制定处理方案和指导事故处理工作的开展具有重要意义。本文以某输油管线发生油品泄漏事故为例,采用 GMS 地下水数值模拟软件分析对比天然状态下的污染物扩散状态和设置防渗墙以及抽水井后对污染物的处理有效性和实用性^[3],为类似事故地下水污染防治措施提供借鉴。

1 研究区介绍

研究区地势东南高、西北低,附近有内陆型河流自东向西流淌。该河以冰川融雪和降水为源头,水量年内分配极不均匀,65%~71%的水量集中在 6~8 月,是季节性河流。地面径流条件良好,地质层为倾斜平原的中部,第四纪堆积物变成底部为砂与砾石夹层,上部以亚砂土为主的沉积结构,地下水埋深 5~

10 m 以下,排水条件良好。主要土壤类型为灰棕漠土、灰漠土、龟裂土和风沙土,隐域性土壤也有发育,大部分为沼泽土、草甸土及盐土。含水层水力坡度约为 3‰,渗透系数约为 9.8 m/d。水源区地下水的补给量主要由三部分组成,即:河道渗漏补给量、山前侧向流入补给量、侧向流入补给量以及平原区降水入渗补给量^[4]。管道采用埋地弹性敷设,放弧曲率半径为 300~1 000 m,局部地段 1 处采取非弹性敷设,弯头半径大于 15 m,管线埋藏深度为 1.8 m。管道途径村庄(工地、房地)等地段,为确保安全,增加安全壁厚 1~2 mm。穿越干渠及泻洪渠时,在管线两头埋藏深度 ≥ 1.8 m 高处水平架空穿过,在架空段增加复壁套管,底部设钢筋混凝土支墩,间距 ≤ 10 m;对 > 10 m 且不宜设钢筋混凝土支墩的跨越段,设悬链吊管钢索。穿河段为了便于安全保卫,采用管线埋深。

2 研究方法

本文应用 GMS 软件中的 3DGrid、MODFLOW 和 MT3DMS 等模块做地下水数值模拟,研究污染物在地下水中的迁移和扩散过程。根据实际水文地质情况,利用 3DGrid 网格化建立模型,在此基础上通过 MODFLOW 建立地下水流场^[5]。检验地下水流场符合实际情况后,使用 MT3DMS 模块建立溶质运移模型并观测污染物随时间的运移路径,在符合工程实际的情况下,依次选择防渗墙和抽出处理在污染物扩散路径上设置处理措施,最终确定效率较高的方案。

2.1 MODFLOW 模块

MODFLOW 之前作为一个独立软件,在科研、生

*基金项目:国家自然科学基金资助项目(61471171)。

王青宽,华北电力大学环境工程专业 2016 级在读硕士,研究方向:地下水污染及治理。通信地址:北京市昌平区北农路 2 号华北电力大学,102206

产、环境保护、城乡发展规划、资源利用等许多行业和部门得到了广泛的应用^[6]。将 MODFLOW 集成到 GMS 软件成为其中一个模块,用来模拟地下水水流运动,在达西定律和质量守恒定律基础上得到基本方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数, LT^{-1} ; h 为水头, L ; W 为单位体积含水层在单位时间流出或者流入的地下水体积,即地下水的源和汇, T^{-1} ; S_s 为储水系数, L^{-1} ; t 为时间, T 。

2.2 MT3DMS 模块

模块化三维溶质运移模型 MT3D 是 C Zheng(郑春苗)在 S. S. Papadopoulos & Associates 公司工作期间开发的模拟软件(1990),此后 MT3D 在地下水领域研究污染物溶质迁移中得到普遍使用^[7]。MT3DMS 作为第二代 MT3D,经过改进其功能得到显著改善,使用功能更加全面,既可模拟地下水流系统中污染物的运移扩散过程,也可模拟污染物的生物化学反应^[8]。MT3DMS 针对溶质运动有三种求解方法。对于所有的运移条件来说,没有一种技术可以完全适用,因此,将它们结合起来可以有效解决溶质运移问题。污染物运移模型的控制方程为:

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

式中: C^k 为物质 k 的溶解浓度, ML^{-3} ; θ 为地下介质的孔隙度,无量纲; t 为时间, T ; X_i 为沿 x 坐标系轴向的距离, L ; D_{ij} 为水动力弥散系数张量, $\text{L}^2 \text{T}^{-1}$; v_i 为孔隙水平平均实际流速, LT^{-1} ; 它与单宽流量存在如下关系: $v_i = q_i / \theta$; q_s 为单位体积含水层流量,其值代表源和汇, T^{-1} ; C_s^k 为化学反应项, ML^{-3} 。

3 石油泄漏情景模拟

不同的事故对污染的影响不同,跑、冒、滴、漏等事故都会危害地下水的水质安全,大型泄漏事故会产生更严重的后果^[9]。针对不同的泄漏情况和处理侧重点,需要对石油类污染物的运移和扩散情况进行模拟,以便制定有效的处理方案。通过 GMS 中的 MODFLOW 和 MT3DMS 模块对当地水文地质和石油类污染物运移情况进行模拟,可以求出石油在地下水中的迁移扩散规律,预测不同时刻及情况下的污染物分布情况,显示地下水受污染程度^[10]。

结合输油管道自身特点,依据危害性最大原则,可将事故情景设置为未采取任何防渗措施,以此模拟泄漏油品在自然状态下对事故发生区地下水的影响。事故设置为输油管体破裂,油品瞬时泄漏,经过包气带短时间阻滞后降至地下水含水层,地下水的水表面处为模拟的泄漏源,考虑到包气带的吸附性和阻滞性,可将泄漏事故视为为期 100 d 的持续污染事故,初始浓度为 1 000 mg/L。泄漏物为石油类污染物,评价标准参照 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》,当石油类的浓度大于 0.3 mg/L 时视为超标^[11]。

3.1 初始条件及流场模拟

模型边界条件概化:依据研究区周边的地貌和水源地的分布情况,选取 1 200 m × 700 m 区域作为模拟研究范围,根据当地海拔高度和包气带层的厚度情况以及水源地相关的水位资料将地下水水头设定为 309 m。含水层结构概化:水源地事故模拟研究区的海拔呈现东南高西北低的趋势,平均海拔在 313 m 左右,含水层类型设定为均质、各向同性的承压层,地下水水流类型设定为稳定流。源汇项概化:模拟区地下水的主要补给来源有侧向径流补给和大气降水入渗补给,主要排水途径为西北边界的径流流出。①侧向径流:径流补给是研究区域地下水的主要补给来源,在数值模拟中,通过输入径流两端的水头值,结合径流导流系数自动得到沿程各点水头同时以线状流量方式补给至研究区中;②降水入渗:大气降水可被定义为面状入渗补给,在软件中选择计算包 Package 中的 Recharge 软件进行模拟,通过收集和查阅当地降水历史资料,计算降水入渗强度后导入 GMS;③开采量:通过调查附近乡镇人口及农作物所需水量计算人工开采量,在软件中选择计算包 Sinks 中的 Well 软件进行模拟处理;④侧向流出量:西北部边界的侧向流出量使用断面法计算初始值,模拟中采用通用水头边界 GHB 模块处理,利用断面法计算值进行校验^[12]。研究区水文地质参数见表 1。

表 1 研究区水文地质参数

渗透系数/ (m/d)	水力坡度	孔隙度	纵向弥散系数/ (m/d)	横纵向弥散度比
9.8	0.003	0.3	20	0.2

依据确定的水头高程和源汇项,运用 GMS 中的 Modflow 模拟出研究区流场。模拟结果如图 1 所示,与预期的地下水流场具有较高的相似度,可以较为准确地反应出该地区地下水情形。

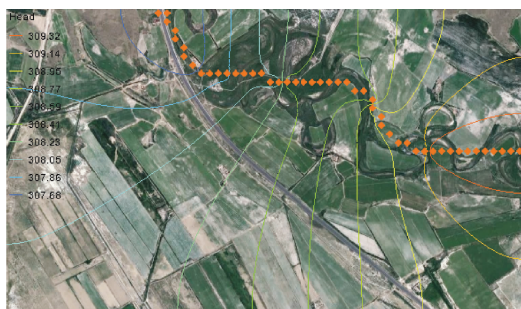


图1 地下水流场模拟



图3 第720 d石油类污染物分布情况

3.2 污染物迁移模拟

本次研究的主要污染物为石油,其初始浓度设定为1 000 mg/L。应力期分为两个时段:第一部分为事故发生时至100 d,主要为油品从包气带的沉降和事故应急反应时间;第二阶段为事故发生后的第100 d至第3 000 d,为泄漏点停止泄漏之后污染物的运移过程。该部分主要应用GMS软件中的MT3DMS模块模拟污染物在泄漏区域不同时间的扩散范围和迁移路径。

图2~4分别显示管道发生泄漏后第100 d、第720 d、第1 700 d时的油品扩散情形和迁移路径。图中的不同颜色代表不同的污染物浓度,即以图例表示,其中最内层蓝色污染羽表示油品的浓度大于3.0 mg/L,最外层的白色污染羽表示油品的浓度为0.3 mg/L。模拟结果显示,随着时间的推移,污染物从中部向西北方向扩散并逐渐汇入河流中,与地下水的主流流动方向保持一致,符合地下水中污染物扩散理论。



图2 第100 d石油类污染物分布情况

由图2~4可知:①在事故发生100 d时,由于事故刚发生,所以中心浓度比较高,甚至油品逆流而上侵染了上游地区,影响范围约为16 800 m²;②在事故发生720 d时,浓度中心已经随着地下水流向下游移动,并且外围的浓度较低的污染羽发生了较大的扩散,影响范围约为38 400 m²;③在事故发生第1 700 d时,整体浓度下降幅度较大,浓度0.3~3.0 mg/L的范围也变大,可以预见扩散到上游油品将随水流流向



图4 第1700 d石油类污染物分布情况

下游,此时的影响面积约为69 330 m²,而且泄漏油品将开始汇入最近的河流之中,意味着将造成更大的地下水安全事故。

事故发生后泄漏油品将对当地的地下水安全造成严重威胁,为了及时地掌握下游地下水中的污染物浓度,应在泄漏点下游附近设置监测井。通过对地下水流场的估计,分别在下游距泄漏点50 m(1[#])和100 m(2[#])处设置两口监测井。为了显示石油污染扩散的严重程度,在不采取防治措施的情况下,观察监测点附近的地下水污染物浓度随着时间的运移扩散情况。监测井浓度变化见图5,由图5可知,因为1[#]井离泄漏点更近,所以该处的浓度更早开始上升直至32 mg/L。随着地下水的流动,900 d之后污染羽中心逐渐远离该点,浓度持续降低直至3 mg/L;2[#]井离泄漏点较远,污染羽到达该点时已是事故发生后第600 d左右,通过观察趋势线可知污染羽中心到达

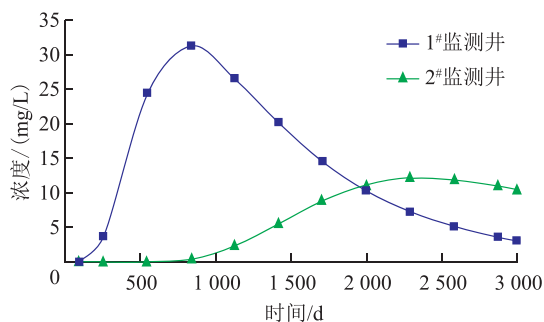


图5 监测井石油类污染物浓度变化

时约为第 2 300 d 左右,由于含水层的稀释和吸附作用,该处的污染羽中心浓度远低于 1# 井处。以上可知,该模拟结果与地下水水流场理论相符,且仅靠地下水稀释和含水层吸附无法将石油类污染物浓度降低至低于超标浓度。

4 防治措施

由上述对油品扩散和迁移模拟结果的分析可知,在输油管道发生事故后,在地下水动力的作用下,泄漏油品会持续扩散和迁移,从而造成极大面积的水体污染和土壤污染,将对周边依附于此水源地的生态环境和人类社会造成严重的威胁。由于地下水流慢、地下水运动机理与系统庞大复杂等特点,事故处理难度大且耗时长,因此需要提前利用数值模拟软件做出预测。同时应当根据模拟结果来设置合适的处理措施来模拟其处理效果,从而制定行之有效的处理方案,对实际的处理工作提供重要参考。

4.1 设置防渗墙

通过对泄漏油品在含水层中的扩散和迁移模拟结果的分析,可以在油品可能穿越的地方设置具有一定透水性又能阻滞油品通过的防渗墙可有效阻止油品进一步扩散和迁移^[13]。根据水源地的水文地质特性以及模拟结果,在管道泄漏点的下游敷设防渗墙,防渗结构间隔一定距离再设置渗漏液检漏井,可有效降低石油污染地下水事故的风险。因此在下游公路西侧设置长为 260 m 的防渗墙,具体位置见图 6、图 7。

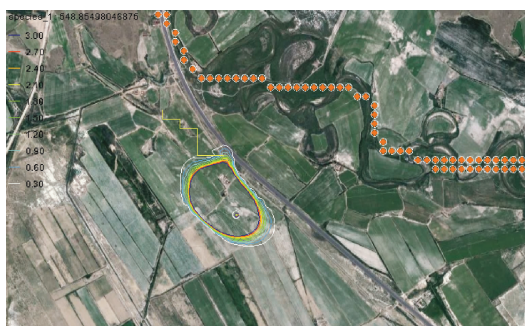


图 6 设置防渗墙第 720 d 时石油类污染物分布情况

将图 6 与图 3 相比可知,在第 720 d 时,设置防渗墙后,污染物到达同一点所需的时间变长,中心浓度有所上升,但是影响范围明显缩小至约为 32 260 m²;将图 7 与图 4 相比可知,污染物到达河流的时间相近,但是在设置防渗墙后到达河流时的浓度明显变小,且浓度大于 3.0 mg/L 的范围更加集中。因此,防渗墙在未过度影响地下水水流场的同时,有效减慢了油品迁移速度,而且让污染羽中心移动变缓的同时更

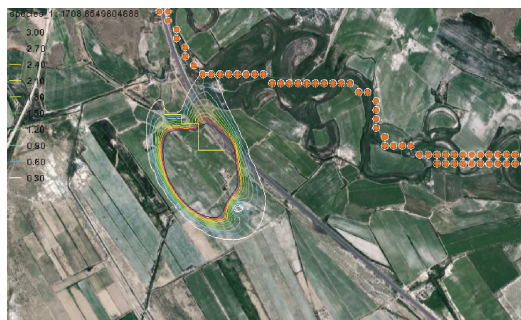


图 7 设置防渗墙第 1 700 d 时石油类污染物分布情况

加集中,易于防范和监控。这就说明在合理位置设置防渗墙具有明显的效果,既能缩小污染范围又能为事故检测反馈和实施抢险留下足够的时间。

4.2 抽水处理法

抽出处理技术是一种异位快速处置技术,是将抽水井布设在含水层中,通过水泵在地下水水流场的基础上人为加一个流场,从含水层中抽出地下水,改变水流模式,将污染过的地下水全部抽出直至浓度符合要求。这种方法的优点在于能够处理范围大及深的污染,且适用范围较广,可以有效控制溶解性污染物的污染扩散范围,避免污染物随地下水流运动的扩散。在污染早期进行这种方法的修复,效果比较快并且周期短、效率高,不会引起二次污染^[14-15]。因此,在下游距泄漏点 180 m 处设置一口抽水井,抽水量为 200 m³/d,同时为了避免地下水系统受过大的干扰,在下游约 190 m 将处理后的水重新注回,期间得到污染物迁移过程的模拟结果如图 8~图 10 所示。



图 8 抽出处理第 100 d 时石油类污染物分布情况

由图 8~10 可知,抽水井的周围形成了一个地下漏斗,污染物在井的四周聚集并被抽出。由图 10 可见,污染物移动到了污染源的下流方向,这是由于上游的水流在向下游移动的过程中,携带了大量的污染物,随着时间的推移,在 2 600 d 后抽水井最终将迁移扩散的污水抽出。

由于第 2 600 d 时,在设置了抽水井的情况下,污染物被处理至符合污染物浓度要求,故通过模拟获取

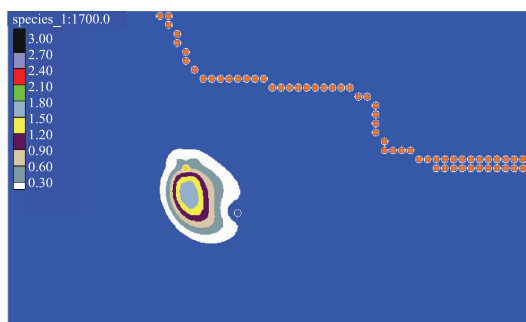


图9 抽出处理第1700 d时石油类污染物分布情况

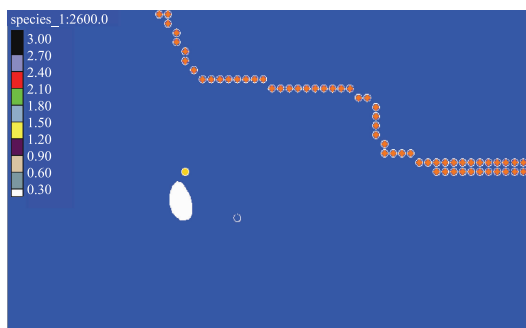


图10 抽出处理第2600 d时石油类污染物分布情况

了前2600 d之前污染物扩散最大的情况,其最后污染面积如表2所示。在第2600 d时,在未设置任何防治措施的情况下,污染物随着地下水可以扩散765 000 m²的面积,在设置了防渗墙时,由于墙体的截留缓冲作用,地下水流场略有改变,虽然可以为推迟污染物流入就近河流争取时间,但是会导致地下水流路径加长从而使得污染面积增大至821 800 m²。通过对设置抽水井的情况的模拟可知,在第900 d左右污染物侵染的面积最大,可达512 400 m²,通过与前两种情景相比,可知这种方法会有效减小石油泄漏的污染范围,并且能够抽出大部分的污染物,具有实际的处理效果。

表2 第2600 d石油污染面积 m²

情景	影响面积
正常情景	765 000
设置防渗墙	821 800
设置抽水井	512 400

5 结 论

①在管道油品泄漏事故的情景下,根据研究区的水文地质资料和现场勘测的数据,建立水源地地下水的水文模型,应用GMS软件进行成品油的扩散模拟。结果表明,持续泄漏100 d的情况下,污染物经过近

10 a的运移,对水源地产生很大面积的影响,油品污染范围可达760 000 m²,不仅会造成项目的经济损失,也会对周边人居安全构成威胁。

②根据模拟结果,提出两种情形的补救方案。在设置防渗墙后,可以有效防止石油泄漏到附近河流,并能减缓污染羽中心的迁移速度,为后续的处理措施争取补救时间。采用抽出处理时,将能够大幅度减小石油泄漏的污染范围,并能在较快的时间内减弱直至消除溢油事故的影响。证明这些措施的确能够阻滞石油类污染物在地下水中的迁移和消除污染物的影响,能够有效地保护地下水。

参 考 文 献

- [1] 梁健,姜华君,张征. GMS在地下水污染迁移模拟中的应用[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(22): 239-241.
- [2] 李韵. 输油管道泄漏对某地下水水源地污染扩散模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016: 1-72.
- [3] 李龙国, 刘国东, 李俊, 等. 基于GMS的油库污染物渗漏迁移过程研究[J]. 人民长江, 2011, 42(增刊2): 152-154.
- [4] 肖华, 郭加朋, 朱宁, 等. 基于Visual ModFlow的苑庄水源地地下水水位预测[J]. 山东国土资源, 2012, 28(10): 37-40.
- [5] 崔素芳. 变化环境下大沽河流域地表水—地下水联合模拟与预测[D]. 济南: 山东师范大学, 2015: 1-145.
- [6] 詹晓敏. 补浪河水源地地下水三维数值模拟[D]. 西安: 长安大学, 2007: 1-75.
- [7] 王丹. 地下水石油污染物运移的数值模拟[D]. 青岛: 青岛大学, 2009: 1-78.
- [8] 吴剑锋, 朱学愚. 由MODFLOW浅谈地下水数值模拟软件的发展趋势[J]. 工程勘察, 2000(2): 12-15.
- [9] 贺国平, 周东, 杨忠山, 等. 北京市平原区地下水资源开采现状及评价[J]. 水文地质工程地质, 2005(2): 45-48.
- [10] 胡汝骥, 樊自立, 王亚俊, 等. 中国西北干旱区的地下水资源及其特征[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 321-326.
- [11] 张岚, 陈昌杰, 陈亚妍. 我国生活饮用水卫生标准[J]. 中国公共卫生, 2007, 23(11): 1281-1282.
- [12] 黄婧. 基于GMS的宁夏清水河上游平原地下水数值模拟研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2013: 1-64.
- [13] 田凯. 煤化工区地下水污染运移特征及污染控制模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 1-88.
- [14] 张艳, 白相东, 张莹. 地下水污染抽出处理技术中抽水井最优布局方案研究[J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(2): 26-29.
- [15] 张超. 南方某化工厂污染修复研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 1-80.

(收稿日期 2018-08-28)

(编辑 王蕊)