油田开发对地下水水源地的影响及对策分析

任 磊[1] 耿 宝[2] 熊运实[2]

(1.中国石油天然气股份有限公司天然气与管道分公司；2.中国石油集团安全环保技术研究院)

摘 要 分析了在油田开发工程可能对水源地产生影响的三类事故,筛选出风险最大的事故是注水井井壁泄漏事故。采用地下水中污染物三维迁移转化模型和 MODFLOW、MT3D 模拟计算软件对某地下水水源地可能受到的石油类污染进行数学模拟，并针对模拟结果提出了污染预防和控制措施。

关键词 油田开发 地下水 污染模拟分析 对策措施

0 引 言

油田开发过程中，油井、注水井距离地下水集中用水水源地较近时，水源地存在一定的被污染风险。这种污染的预测和评价因子应包括石油类、pH、COD、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、硫化物、挥发酚等，其中石油类是最典型、最重要的污染物。本文在对采油过程进行认真梳理的基础上，分析石油类进入地下水含水层的最可能途径；选用合适的数学模型对石油类随地下水迁移扩散过程进行模拟，得出水源地可能受到污染的程度和时段；在此基础上，提出污染防治措施。

1 事故状态下地下水污染途径分析

石油开采工程正常运行情况下一般不会对地下水产生影响，只有发生事故后，原油或含油废水从系统中溢出才会对周边环境产生影响。对地下水可能产生污染的事故主要包括井喷、输油管线泄漏、井壁泄漏三类。

1.1 井 喷

目前，采油井口防喷技术已相当成熟，在严格执行钻井施工 HSE 管理要求的前提下，发生油井井喷的可能性极小。但是，井喷一旦发生，井下液体向上喷出，散落在井口周边，一般会形成明显连片黑色污染痕迹。在完成井口控制后立即回收、清理污油，井喷现场不会因遗留大量的落地油而成为地下水的污染源。所以，只要及时有效处理，井喷事故基本不会对地下水产生明显影响。

1.2 输油管线泄漏

输油管线泄漏一般可分为涌漏和渗漏。

涌漏是指管道因外力破坏、地质灾害等原因发生破裂使原油大量涌出，对周边表层土壤环境迅速造成严重污染的事故。涌漏发生后，管线压力迅速下降，计量装置也可迅速监测到进出流量差异，从而发出报警提示，抢修人员迅速实施抢修恢复和油品回收。被污染的表层土壤将会得到及时有效清理，一般不会对地下水造成污染。

渗漏一般是因管道老化、焊接缺陷等造成管道表面出现细微裂缝，原油少量、缓慢渗出的事故。这种事故初期一般不易被发现，只有到后期泄漏量较大或进行专门的管道检测时才能发现并采取有效的污染控制措施。一般渗漏量很少，由于表层土壤颗粒空隙间毛细力的顶托作用，石油类污染物主要集中在 0～20 cm 的表层土内，在 20 cm 以下，石油类也可能沿着裂缝、植物根孔等下渗，最大下渗深度不会超过 1 m，一般不会影响地下水。同时，目前管道制管、焊接、防腐技术已日臻成熟，因管道材质和腐蚀等问题发生管道渗漏的可能性极小。

1.3 井壁泄漏

油田注水井、采油井如果固井质量不好，井壁可能出现裂缝，回注水、井筒内原油可能经裂缝渗出。进一步分析表明，回注水井内压力较高，一般可达 15 MPa 以上,所以回注水井筒发生泄漏的可能性更大。一旦渗漏点位于地下水含水层附近，漏出物直接进入含水层，并会沿水力坡降方向迁移，如果下游有地下水水源地则可能影响水源地水质。此类事故发生的可能性很小，但事故后果严重，治理比较困难。以下主要针对回注水井筒泄漏污染，通过模型模拟的方法对

任磊，2002 年毕业于西安建筑科技大学环境工程专业，博士，高级工程师，现在中国石油天然气股份有限公司天然气与管道分公司质量安全环保处从事环境保护管理工作，已发表论文 15 篇。通讯地址：北京市东城区安德路洲际大厦，100011

污染过程进行分析。

2　污染过程模拟

2.1 基本模型选择

石油类为难降解、难溶于水的有机物，在地下水中降解速度慢，其迁移转化过程的对流作用、弥散作用和吸附作用相对显著。采用如下三维点源基本模型进行污染物迁移模拟：

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial x_i}(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_j}) - \frac{\partial C}{\partial x_i}(V_i C) + \frac{q_s}{\theta}C_s - \lambda(C + \frac{\rho_b}{\theta}\overline{C}) = (1 + \frac{\rho_b}{\theta}\frac{\partial \overline{C}}{\partial C})\frac{\partial C}{\partial t} \\ C(x_i \geq 0, t = 0) = 0 \\ C(x_i = 0, t > 0) = C_0 \\ C(x_i = \infty, t > 0) = 0 \end{cases}$$

式中，C为溶解于水中的污染物的浓度；C_0为污染源浓度；t为时间；x_i为空间坐标；D_{ij}为水动力弥散系数；v_i为地下水渗透流速；q_s为源(正值)或汇(负值)的单位流量；C_s为其他源或汇的浓度；θ为孔隙度；λ为一阶反应速率常数；ρ_b为多孔介质的比重；C为吸附在固相上的污染物浓度。固液间吸附过程采用线性吸附模型模拟，$\overline{C}=K_d C$（K_d为吸附系数）。

2.2 模型模拟条件确定

2.2.1 基本水文条件确定

某油田注水井与地下水水源地水源井距离较近，水源地内有水源井 10 口，注水井与水源井最小间隔约 700 m。由于地下水水源井的开采会形成一定的降落漏斗，地下水流会流向水源井集中分布区。水源地及其周边流场内水位降深用有限差分法计算，具体计算时采用美国地质调查局的MODFLOW软件[1]。

2.2.2 污染初始浓度确定

模拟区域内油田开发要求回注水石油类浓度小于 10 mg/L，按照偏于保守的原则，确定回注水井壁发生泄漏后，漏出水石油类初始浓度为 10 mg/L。在这一浓度下，石油类在水中的状态主要为细分散态和溶解态，在水中可以稳定存在，其随水流迁移的过程符合地下水中盐份等溶质迁移的基本规律。

2.2.3 其他条件确定

除油田开发外深层地下水没有其他石油类污染源，所以其他源汇相初始值C_s设为 0 mg/L。K_d值采用有关试验实测数据[2]。公式中的其他参数采用水源地所在地地层相关数据，见表 1。

表 1　模拟参数值一览

参数	取值	参数	取值
C_0(mg/L)	10	D_{ij} (m²/d)	0.2
V_i(水平流速)(m/d)	9.8	q_s	0
θ	0.3	ρ_b (kg/m³)	2000
λ	0	k_d (mL/g)	1.1

2.3 模拟计算

采用MT3D模拟计算软件实现 2.1 中公式的计算。MT3D是一套基于有限差分方法的污染物迁移模拟软件[3,4]，近年来在国外水文地质和水环境模拟等领域的研究中已得到较为广泛的认可；该软件比较全面地考虑了污染物在地下水中的对流、弥散和化学反应等过程，可以灵活处理各种复杂的源汇项和边界条件，能较好地实现 2.1 中公式的计算过程，该软件可和MODFLOW软件配合使用。

2.4 模拟结果分析

表 2　沿水流方向不同时段地下水中石油类浓度　　mg/L

时间(年)	距离（m）							
	50	100	150	200	300	400	500	1000
1	0.21	0.009	0	0	0	0	0	0
2	0.55	0.06	0.004	0	0	0	0	0
3	0.87	0.15	0.019	0	0	0	0	0
4	1.15	0.26	0.044	0.006	0	0	0	0
5	1.42	0.39	0.084	0.014	0	0	0	0
6	1.64	0.53	0.13	0.028	0	0	0	0
7	1.85	0.67	0.19	0.048	0.002	0	0	0
8	2.03	0.81	0.26	0.073	0.004	0	0	0
9	2.18	0.95	0.34	0.10	0.007	0	0	0
10	2.26	1.08	0.42	0.14	0.011	0	0	0
11	2.37	1.13	0.45	0.15	0.014	0	0	0
12	2.44	1.21	0.50	0.18	0.018	0	0	0
13	2.54	1.32	0.58	0.22	0.026	0	0	0
14	2.63	1.43	0.67	0.27	0.037	0	0	0
15	2.70	1.52	0.75	0.32	0.049	0	0	0
16	2.76	1.61	0.83	0.38	0.063	0	0	0
17	2.82	1.69	0.90	0.43	0.079	0.01	0	0
18	2.86	1.76	0.97	0.48	0.098	0.01	0	0
19	2.90	1.82	1.04	0.54	0.117	0.02	0	0
20	2.94	1.88	1.10	0.59	0.138	0.02	0.063	0

井壁泄漏事故发生后，沿水流方向不同距离(50、100、150、200、300、400、500、1000 m)、不同时段地下水中石油类污染物浓度模拟结果情况见表2。距离为500m处在1～19年检测浓度均为0，第20年浓度为0.003mg/L；1000m处1～20年检测浓度均为0。由于一般油田正常的开发周期在20年内，模拟最长时段取20年。

不同条件下地下水中石油类浓度与时间的关系见图1、图2。

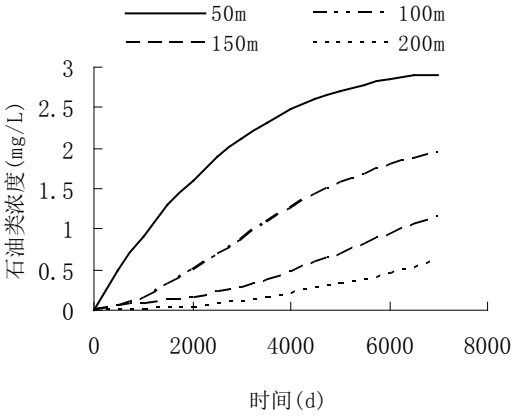

图1 距污染源不同距离石油类浓度随时间的变化

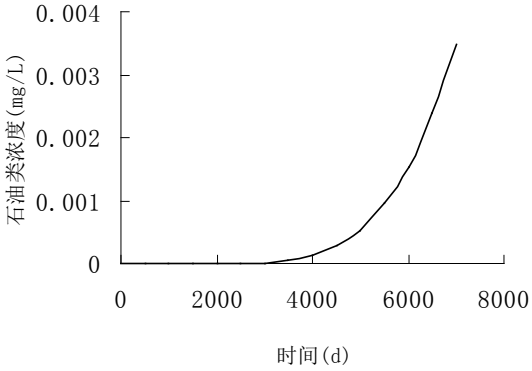

图2 距污染源下游500 m处石油类浓度随时间的变化

以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类标准，石油类浓度0.05 mg/L作为超标界限分析，则距离污染源50 m处第1年超标，距离污染源100m处第2年末超标，距离污染源150m处第5年超标，距离污染源200 m处第8年末超标，距离污染源300 m处第16年末超标，距离污染源500 m处第20年末浓度仅为0.003mg/L(标准值的6%)，距离污染源1000 m处，在模拟的20年内基本不会受到影响。

同时，由图1、图2可以看出，距离污染源越近的区域受污染越快越严重；地下水受石油类污染的程度有趋于饱和平衡的趋势，距离污染源越近这种平衡越早达到，平衡值越大。例如，距污染源50m处，10年后污染强度上升的趋势就明显减弱，第10～20年间浓度上升量为前10年上升量的28.3%，平衡值接近3.0mg/L；而距污染源200m处，第10～20年间浓度上升量为前10年上升量的320%，且20年后还处于平稳上升的阶段，经数学计算，其平衡浓度在0.8 mg/L左右。

3 地下水水源地污染防范措施

由上述分析计算可知，石油类在地下水中经过对流、弥散、吸附等作用会在一定范围内迁移，形成污染的扩散。在油田开采原油过程中，当采油、注水设施距离地下水源地较近时，由于事故造成的泄漏有可能污染水源。为了保证水源井的水质安全，结合计算结果提出以下措施。

3.1 保持间距

加大间距可以显著降低水源地受污染的风险，一般应保证油田采油井和注水井与水源地内水源井间距大于500 m。

3.2 强化固井

加强监督管理，以确保固井质量的合格率达到100%，固井水泥帽深度要求达到水源井目标采水层深度以下。

3.3 持续监测

在采油井、注水井与地下水源地水源井间打若干监测井进行持续观测，从而及早发现泄漏事故。监测井深与水源地水源井深度一致。监测项目至少应包括石油类和挥发酚类等油田开发特征污染物，监测周期应满足每半年1次。

3.4 污染源控制

如果在监测井或水源井中监测到石油类或挥发酚含量在短时间内有明显升高的现象，必须立即停止使用距离最近的油田注水井、采油井，并继续进行监测，同时进行漏失情况检查，这时可能出现以下两种情况：一是如果被停用的生产井确实发生含水层位泄漏，应立即对该井进行封井，消除石油类污染源；二是如果被停用的生产井未发生泄漏，说明距离更远的

生产井出现了泄漏事故，应逐渐扩大检查范围，确定泄漏源，并予以封井处理。

实施关井、封井后，立即对地下水石油类污染进行治理。具体可采用原位化学氧化处理法（ISCO），该法是近年来提出的能够有效处理土壤和地下水中石油类污染物的一种技术，所用的氧化剂是ClO_2 和O_3。处理过程中，可沿被污染区域的地下水流向方向，每50 m布置1口注入井，ClO_2、O_3以气体的形式直接注入污染区，氧化其中的石油烃，特别是O_3在氧化过程中可自行分解为O_2，使水中的DO含量增加，为自然环境下的微生物处理提供适合的条件，可进一步提高处理效果。在污染源得到控制的条件下，一般受影响区域水质在3个月内得到有效改善。

3.5 水源地水源井污染控制

如果水源井中监测到石油类或挥发酚含量短时间明显升高，说明区域地下水水质已受到明显影响，需立即对直接受影响的水源井实施关井停水，并立即采取以下应急和替代供水措施：

◆ 适当加大对距离油田开发区域较远的水源井采水量的应急补充供水，并持续做好监测。

◆ 立即在距离被污染区域5 km以上的地域选择新址打供水水源井替代原有井。一般打新井和建立相关供水管道可在3个月内完成，完成后启用新水源井，原受影响的水源井未经检验合格不能供水。

4 结　论

◆ 对地下水可能产生污染的事故主要包括井喷、输油管线泄漏、井壁泄漏三类,其中回注水井井壁泄漏虽然发生的可能性很小，但由此造成的地下水源地污染后果最为严重。

◆ 可采用三维点源基本模型进行污染物迁移模拟计算，用MODFLOW软件和MT3D软件分别进行流场内水位降深和污染物迁移转化过程计算。采用某地的水文地质数据计算结果表明，距离污染源50 m处地下水石油类第1年超标，距离污染源100 m处第2年末超标，距离污染源150 m处第5年超标，距离污染源200 m处第8年末超标，距离污染源300 m处第16年末超标，距离污染源1000 m处，在模拟的20年时段内基本不会受到影响。

◆ 在地下水石油类污染预防与治理方面，应采用保持间距、强化固井、持续监测的方式预防事故的发生；并采取污染源控制和水源地水源井污染控制的综合治理措施，确保供水水质安全。

参 考 文 献

[1] McDONALD J M,HARBAUGH A W.A modular three-dimensional finite-difference flow model. Techniques of Water Resources Investigations of the U S Geological Survey,Book 6[C],1988,1,14～39

[2] 陈家军,王红旗,奚成刚,张俊.大庆油田开发中石油类污染物对地下水环境影响模拟分析[J].应用生态学报,2001,12(1):113～116

[3] 朱玉水,段存俊.MT3D—通用的三维地下水污染物运移数值模型[J].东华理工学院学报(自然科学版),2005,28(1):29～32

[4] ZHENG C,WANG P P1 MT3DMS. A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems (Release DoD-3.00.A):Documentation and User’s Guide[M]. The University of Alabama,1998.1～125

（收稿日期　2008-08-25）

（编辑　王 薇）

上半年全国主要污染物排放总量双下降

环境保护部部长周生贤在10日举行的全国重点流域水污染防治工作会议上披露，今年上半年，全国主要污染物排放总量实现双下降，其中，二氧化硫排放量同比下降3.96%，化学需氧量同比下降2.48%，约束性指标的效果开始显现。

周生贤说，两项主要污染物排放总量持续呈现双下降的良好势头，是党中央、国务院高度重视，各地各部门积极推进的结果，其中工程减排、结构减排、管理减排以及环境经济政策推动减排等各项综合措施发挥了重要作用。

(摘自国家环境保护部网　2008-09-10)