

# 油田特征污染物在包气带中的迁移规律

高文宇 李娜 王萌

(中国石油大庆油田质量安全环保监督评价中心)

**摘 要** 应用 HJ 964—2018《环境影响评价技术导则 土壤环境(试行)》中推荐的预测模型,对油田特征污染物-石油烃在包气带中的迁移建立了数学模型,预测石油烃在包气带中的垂直迁移,计算得出当石油烃进入包气带后,经约 4 d 迁移至地下 34 cm(N2),20 d 达到峰值浓度;38 d 迁移至地下 450 cm(N6),140 d 达到浓度峰值。为油田日常的环保管理和污染防治措施提供了有力的技术支持。

**关键词** 包气带; 溶质运移; 石油烃

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2019.06.006

文章编号:1005-3158(2019)06-0024-04

## 0 引 言

土壤是经济社会可持续发展的物质基础,保护好土壤环境是推进生态文明建设和维护国家生态安全的重要内容。当前我国土壤环境总体状况堪忧,根据 2014 年 4 月 17 日《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤环境总的点位超标率为 16.1%,已成为全面建成小康社会的突出短板之一。

为切实加强土壤污染防治,打好净土保卫战,2016 年 5 月国务院发布了《土壤污染防治行动计划》国发[2016]31 号;2018 年 8 月 31 日人大常委会第五次会议审议通过了《中华人民共和国土壤污染防治法》;为贯彻落实以改善土壤环境质量为核心,坚持预防为主、保护优先的源头防控理念,2018 年 9 月 13 日生态环境部批准了 HJ 964—2018《环境影响评价技术导则 土壤环境(试行)》。其规定了土壤环境影响评价的一般性原则、工作程序、内容、方法和要求,填补了现有环评导则的体系空缺。同时导则首次提出包气带中污染物溶质的垂直运移预测方法,对非饱和带的运移规律给予了量化说明,弥补了地下水导则中地面至地下水含水层之间的预测空窗。

该导则于 2019 年 7 月 1 日实施,但与导则提供的预测模型应用鲜有报道,通过文献查阅发现<sup>[1-5]</sup>,HYDRUS-1D 软件中的溶质运移模型<sup>[6]</sup>与导则中提出的预测方法一致,可精确模拟非饱和带介质中的运移。

本文运用该软件构建水流运动和溶质运移模

型,模拟 D 油田 E 采油厂生产过程中特征污染物石油烃在非正常情况下遗撒至包气带后的迁移过程,预测其到达潜水含水层时的时间和浓度,为该类污染在潜水含水层中的运移提供初始时间和初始浓度值。

## 1 工程概况

该工程位于 A 市 B 区 C 村,隶属于 D 油田 E 采油厂,调查了油田 29 km<sup>2</sup> 区域内的水文地质情况,布设水文地质点数 15 个,调查范围见图 1。由室内原位渗透试验获得渗透系数。调查结论如下。

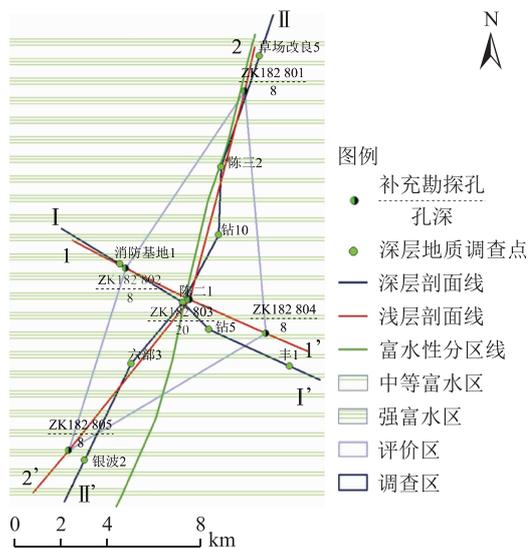


图 1 调查区域示意

该地区地表普遍被第四系覆盖。地面海拔高程在 145.4~148.6 m,相对高差 3.2 m。地表为缓波状

起伏的低平原地貌景观。第四系(Q)地层在调查区广泛,其厚度一般 55.5~69.0 m。第四系地层上部

为粉质黏土-黏土,底部为砂砾石,具有较大孔隙。见图 2。

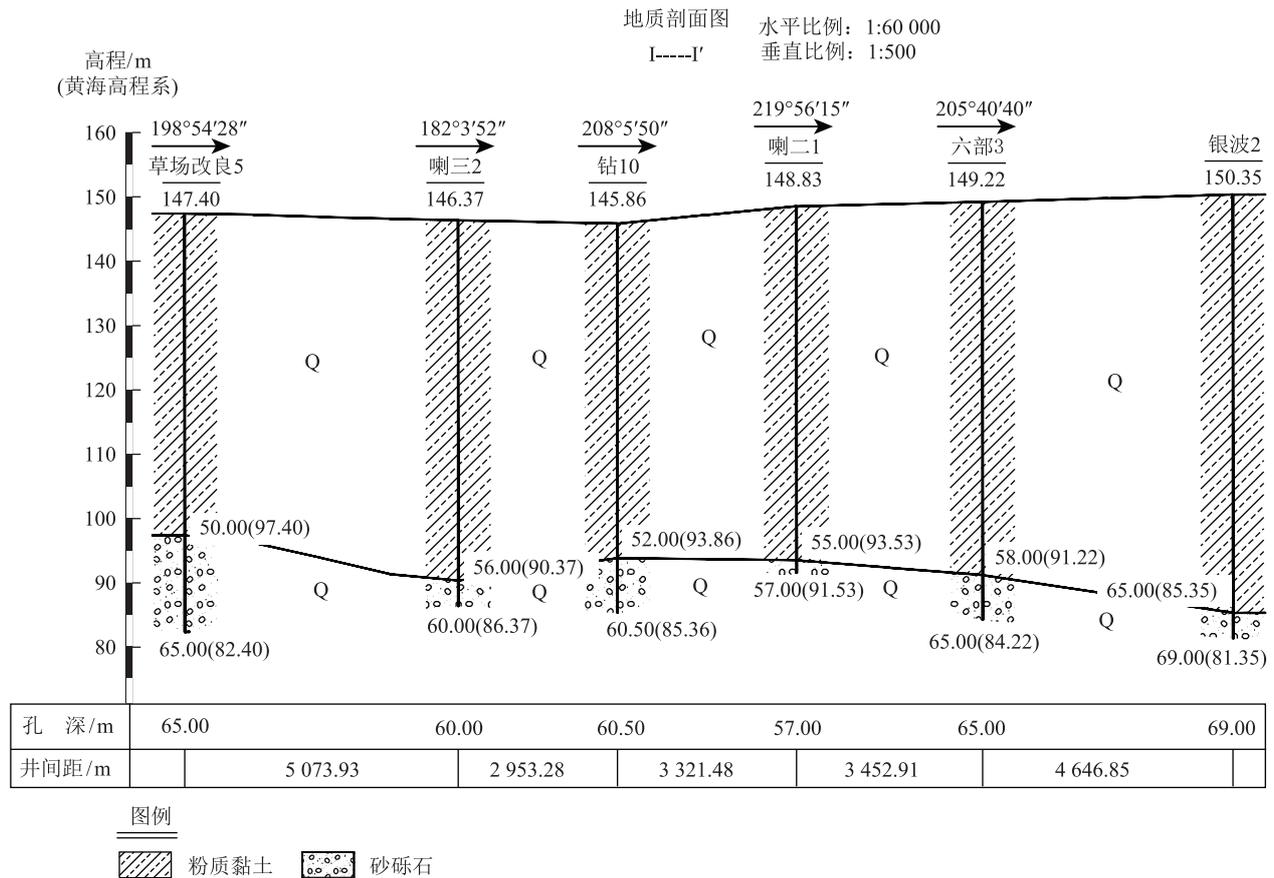


图 2 调查区域地质剖面

根据浅部钻孔资料,所揭露的地层按照岩土成因、结构、性质综合划分 3 层,分别为粉质黏土、粉细砂、黏土。

1)粉质黏土:黄褐-灰黄色,冲积成因,渗透性差,为微透水层,土质均匀。渗透系数实测值  $K=0.022 \text{ m/d}$ ,孔隙度实验室实测值  $n=43.68\%$ ;层顶高程 145.4~148.6 m,层厚 1.5~8.0 m。

2)粉细砂:黄色,冲积成因,渗透性较好,为透土层,主要成分为石英-长石,局部含粉土。渗透系数值  $K=2.0 \text{ m/d}$ ,孔隙度值  $n=40.0\%$ 。

3)黏土:灰色,淤积成因,渗透性差,可视为隔水层,土质均匀。渗透系数实验室实测值  $K=0.0002 \text{ m/d}$ ,孔隙度实验室实测值  $n=40.82\%$ 。

根据上述资料,工程所在包气带厚度最大值为 4.5 m。粉质黏土及粉细砂,局部夹粉土。其中粉质黏土约为 0~3.5 m,粉细砂约为 3.5~4.5 m。见图 3。

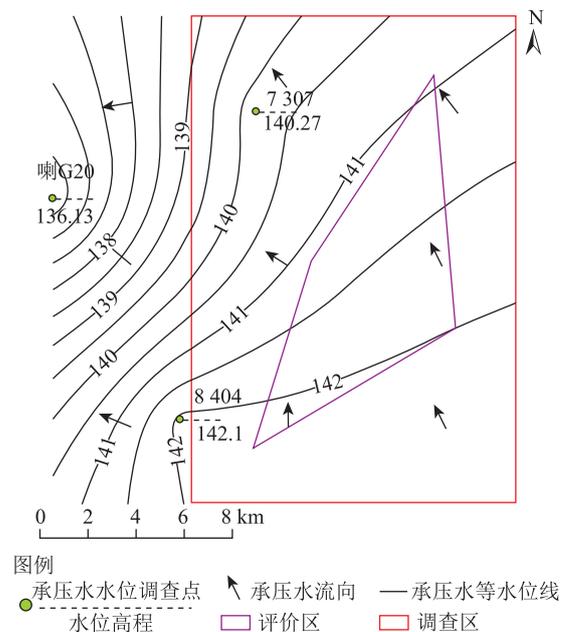


图 3 调查区域包气带厚度等值线

## 2 研究方法

### 2.1 污染源强设定

油田在正常生产情况下已有完善的施工作业流程,在作业期间会采取铺设防渗布等措施保证原油不会进入土壤,但在非正常工况下可能会产生少量落地油,通过多年经验数据,每口油井作业期间可能落地的原油按 50 kg/井次计,本次设定为 1 口油井在非正常工况下,作业产生落地油 50 kg。原油落地后以溶质形式进行扩散,原油在其中的浓度约为 500 mg/L。

### 2.2 边界条件设定

参照 Richards 方程<sup>[7]</sup>中的边界定义来界定模型的地质边界和浓度边界。模型地质上边界定义为大气边界(定义为 0),下边界设定为潜水自由水面处(定义为 450 cm);浓度上边界选择浓度通量边界(500 mg/L),下边界选择零浓度梯度边界(取值为 0)。

### 2.3 预测场景设定

在特定情况下,假定落地原油未被及时发现,至下次检修作业期间持续遗留在地面。考虑实际情况,作业检修期间间隔时间约为 100~200 d,故设定预测时间为 100 d(N1~N5)、200 d(N6),设定为连续注入点源情景。

### 2.4 土壤水力参数的设定

根据工程勘察钻孔资料及相关的地质柱状图,确定工程包气带厚度为 4.5 m,垂向按 1 cm 每格将其剖分为 450 格,在剖分图上设置 6 个观察点,其分布见图 4。

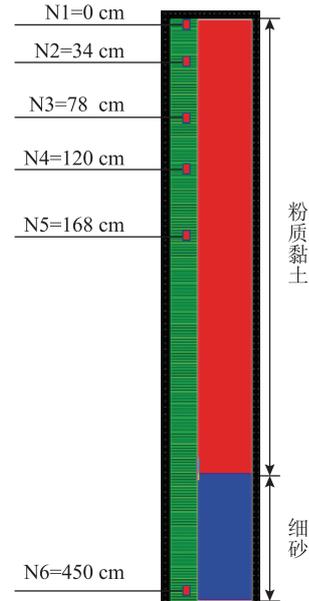


图 4 剖分示意

根据实际情况结合软件,土壤水力参数见表 1。

表 1 土壤水力参数

土壤类型	土壤层次/ cm	残余含水率 $\theta_r$ / ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和含水率 $\theta_s$ / ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	经验参数 $\alpha$ / ( $\text{cm}^{-1}$ )	曲线形状 参数 $n$	渗透系数 $K$ / ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	经验参数 $L$
粉质黏土	0~350	0.07	0.36	0.005	1.09	2.2	0.5
细砂	350~450	0.065	0.41	0.075	1.89	200	0.5

### 2.5 数学模型的建立

本次预测主要利用非饱和带水分运移模型和非饱和带溶质运移模型。

#### 2.5.1 非饱和带水分运移模型

假定水文运移过程中气象作用、温度梯度作用可忽略,其水文运移采用 Richards 方程的形式表示,公式如下:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$-K \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = V(z, t) \quad z = 0, t \geq 0 \quad (2)$$

$$\theta(z, t) = \theta_s \quad z = 0, t \geq 0 \quad (3)$$

$$\theta(z, t) = \theta_0 \quad 0 < z \leq H, t = 0 \quad (4)$$

式中: $\theta$  为土壤体积含水率,  $\text{L}^3/\text{L}^3$ ;  $t$  为水分运移时间, T;  $K$  为土壤水的非饱和水力传导率,  $\text{L}/\text{T}$ ;  $h$  为非

饱和带压力水头, L;  $\theta_s$  为饱和含水率;  $\theta_0$  为初始含水率;  $V$  为渗透通量,  $\text{L}/\text{T}$ ;  $H$  为非饱和带深度,  $\text{L}_0$ 。

#### 2.5.2 非饱和带溶质运移模型

忽略污染物在气相中的扩散,忽略液相中通过对流和弥散作用进行溶质运移时的化学反应,运用对流-弥散方程<sup>[8]</sup>描述以为溶质运移,公式如下:

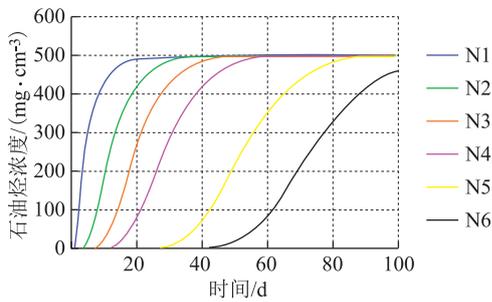
$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial qc}{\partial x} - \Phi \quad (5)$$

式中: $C$  为土壤液相中石油烃浓度,  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ;  $S$  为土壤固相中的石油烃浓度,  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ;  $D$  为综合弥散系数,  $\text{cm}^2/\text{d}$ ;  $q$  为渗流速率,  $\text{cm}/\text{d}$ ;  $\Phi$  为源汇项。

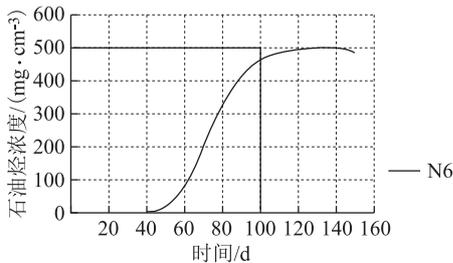
## 3 模拟预测结果

### 3.1 石油烃浓度与时间变化关系

石油烃浓度-时间关系曲线见图 5。



(a) 包气带不同深度下, 石油烃浓度-时间关系曲线



(b) 潜水自由水面处, 石油烃浓度-时间关系曲线

图5 石油烃浓度-时间关系曲线

由图5可知,石油烃进入包气带后,经约4 d迁移至地下34 cm(观察点N2),经约20 d达到峰值浓度;经约40 d迁移至地下450 cm(观察点N6),经约140 d达到浓度峰值。

由此结果可知,如已知原油落地时间(生产单位可通过油井作业日期和发现原油时间推算),可精确的计算出需要治理污染土壤的剖面深度,为油田日常的环保管理和污染防治措施提供了有力的技术支持。

### 3.2 石油烃浓度与包气带深度关系

石油烃浓度-深度关系见图6。

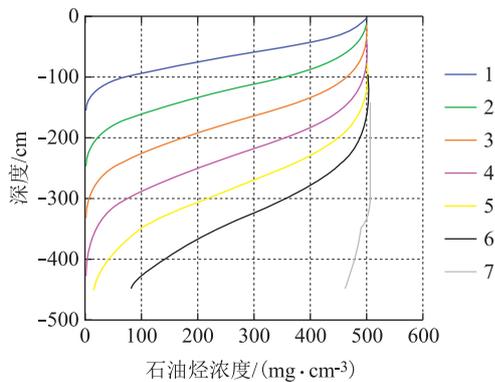


图6 石油烃浓度-深度关系

由图6可知,在10~70 d内石油烃在包气带剖面浓度分布情况,随着时间的增加,石油烃浓度逐渐趋于一致,最终石油烃达到平衡浓度。

## 4 模型验证

### 4.1 运用溶质运移土柱试验验证模型准确性

为验证模型的准确性,通过对研究地区的土壤进行溶质运移土柱试验得出的实测结果与该模型预测数据进行横向测评。

设定剖面深度为21 cm,测试时间为48 h,溶质浓度值为500 mg/L。实测值与预测值对比见图7。由图7可知,石油烃随深度增加浓度成倍递减,且两者数值拟合程度较高。故该模型能较准确的反映污染物在包气带中的运移规律。

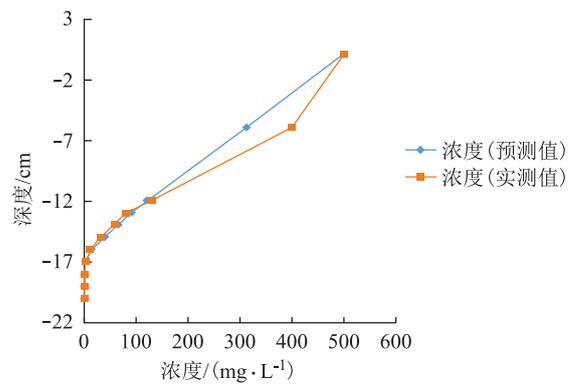


图7 实测值与预测值对比曲线

### 4.2 运用物料分析验证模型精度

根据土壤岩性分布,纵向设置0,9,21,300,450 cm共计5个观察点。模型计算总耗时0.15 s,迭代次数为210。

物料平衡分析见表2。由表2可知,水分及污染物等物料在模拟范围内基本守恒。

表2 模型物料平衡分析

项目	运行前	运行后
整个研究区域 流入量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$0.85750 \times 10^{-1}$	$0.85750 \times 10^{-1}$
平均压力水头/cm	$-0.12858 \times 10^3$	$-0.12858 \times 10^3$
污染物总量/mg	$0.35519 \times 10^4$	$0.35519 \times 10^4$
石油烃的平均 浓度/( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$0.21930 \times 10^2$	$0.21930 \times 10^2$
区域含水量绝对误差/ $\text{cm}^3$	$0.38147 \times 10^{-4}$	
区域含水量相对误差/%	0.001	
区域溶质绝对误差/mg	$-0.14648 \times 10^{-2}$	
区域溶质相对误差/%	0.000	

(下转第33页)