

# Study on the Mechanisms of Water Flow and Petroleum Hydrocarbon Contaminant Transport in Silt Layers

Lili Jiang

Hunan International Engineering Consulting Group Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

## Abstract

Taking a skid-mounted gas station at a general aviation airport in Hunan as the research object, the HYDRUS-1D software was employed to simulate and predict the migration of petroleum hydrocarbons in the vadose zone after an oil tank leakage. The time required for petroleum hydrocarbons to contaminate the vadose zone under specific hydrogeological conditions and the variation law of concentration values at different profile depths were calculated, providing a basis for the conclusions of the environmental impact assessment. Based on the simulation results, the contamination of petroleum hydrocarbons in silty soil is the outcome of a dynamic equilibrium among physical migration (infiltration + dispersion), biodegradation, and adsorption. Biodegradation serves as the key process regulating the contamination degree; otherwise, the concentration in the shallow layer would continuously accumulate and rapidly leach into the deep layer. However, the presence of microorganisms in silty soil significantly reduces the overall contamination level, while also prolonging the cycle of contaminant plume diffusion to the deep subsurface.

## Keywords

Solute transport; Petroleum hydrocarbons; Numerical model

## 粉土层中水流运动和石油烃污染运移规律研究

姜丽丽

湖南省国际工程咨询集团有限公司, 中国·湖南长沙 410016

## 摘要

选取湖南某通用机场撬装加油站为研究对象, 利用HYDRUS-1D软件来模拟预测油罐发生泄漏后石油烃在包气带中的运移情况, 计算得出石油烃在特定水文地质条件下污染包气带所需时间以及不同剖面深度浓度值的变化规律, 为环境影响评价结论提供依据。通过模拟结果可知, 石油烃在粉土中的污染是“物理迁移(渗透+弥散)、生物降解、吸附作用”动态平衡的结果, 生物降解是控制污染程度的关键过程, 否则浅部浓度会持续累积并快速向深层渗漏; 而粉土中微生物的存在, 大幅降低了整体污染水平, 但也导致污染羽向深部扩散的周期延长。

## 关键词

溶质运移; 石油烃; 数值模型

## 1 引言

湖南省作为全国首个全域低空空域管理改革试点省, 积极推进通用机场建设, 先后出台了《湖南省“十四五”现代化综合交通运输体系发展规划》、《湖南省通用机场布局规划(2021-2035年)》等规划文件, 旨在构建“1+13+N”通用机场网, 基本实现通航飞行“县县通”。撬装加油站作为通用机场最常见的供油工程, 在保障通用机场能源供给的同时, 也成为场地潜在的环境污染源。以往的环境影响评价工作, 重在地对地下水环境的影响预测, 往往忽略石油烃对包气带的影响, 缺乏对渗入土壤的时间及浓度的定量评估, 造成环境应急响应不够精确。

【作者简介】姜丽丽(1985-), 女, 中国山东威海人, 硕士, 工程师, 从事环境影响评价研究。

本文运用目前土壤预测最常用且有良好模拟精度的HYDRUS-1D软件来建立项目场地的水文地质模型, 通过构建包气带水流运动和溶质运移模型, 模拟油罐发生小孔泄漏后, 石油烃渗入包气带后的迁移转化过程, 并模拟石油烃在包气带中的影响范围。

## 2 建设场地概况

### 2.1 土壤类型

该通用机场位于湖南省东南边陲, 占地面积约260亩, 总平面布置分为飞行区和航站区, 撬装加油站位于航站区西侧, 采用地上式双层卧式油罐, 其中航空煤油储罐50m<sup>3</sup>, 航空汽油储罐30m<sup>3</sup>。根据项目地勘资料, 建设场地分布的岩土层自上而下有: 第四系覆盖层耕土①、粉质黏土②; 下伏基岩为白垩系全风化泥质粉砂岩③、强风化泥质粉砂岩④、中风化泥质粉砂岩⑤。

## 2.2 土壤理化性质

本次收集了场区撬装加油站处实测的土壤理化特性数据。

## 2.3 地下水类型

场地内地下水类型主要为上层滞水、基岩裂隙水。上层滞水赋存于耕土，受大气降水补给，水位因季节而异，未形成统一水面，水量贫乏，勘察期间未见得形成稳定层状的地下水水位；基岩裂隙水主要赋存于下伏白垩系层中，透水性差，本次也未测得该地下水水位。区域包气带渗透性强，包气带防护性能弱。

## 3 情景设置

本次考虑情景为：防渗层破损的情况下，泄漏油品入渗对土壤的影响。

## 4 研究过程

### 4.1 水流运移的数值模型

水是污染物运移的载体，若进行土壤中污染物运移的模拟需要先对土壤中水分运动过程进行构建。根据地勘资料，项目包气带主要为中风化泥质粉砂岩，因此确定以中风化泥质粉砂岩包气带为建模对象。

#### 4.1.1 包气带水流运动的概念模型

项目区包气带水流运动以垂向为主，因此将包气带概化为垂向一维的水流运动。

#### 4.1.2 包气带水分运移的数值模型

控制方程：土壤中水流运动的控制方程为一维垂向饱和和非饱和水流运动方程（Richards 方程）<sup>[1]</sup>：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \left( 1 + \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right]$$

式中： $\theta$  为土壤体积含水率（ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ）； $k$  为非饱和和渗透系数（ $\text{cm/h}$ ）； $t$  为时间变量（ $\text{h}$ ）； $h$  为压力水头； $z$  为空间变量（ $\text{cm}$ ），地表为原点，向上为正。

土壤水力参数：本次收集了粉土的土壤水力参数。

边界条件

项目区位于湖南的东南部，属于大陆型亚热带季风湿润气候，降雨集中期在每年 4-6 月，考虑到污染物在包气带中的运移特点，同时参考包气带水流运动规律研究，本次模拟的包气带上边界设置为大气边界 - 可积水，下边界设置为自由排水边界。

## 4.2 溶质运移的数值模型

### 4.2.1 预测模型

一维非饱和溶质垂向运移控制方程<sup>[2-3]</sup>：

$$\frac{\partial (\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qc)$$

式中： $c$  为污染物介质中的浓度， $\text{mg/L}$ ； $D$  为弥散系数， $\text{m}^2/\text{d}$ ； $q$  为渗流速率， $\text{m/d}$ ； $z$  为沿  $z$  轴的距离， $\text{m}$ ； $t$  为时间变量， $\text{d}$ ； $\theta$  为土壤含水率， $\%$ 。

### 4.2.2 模型概化

边界条件：将石油烃的入渗概化为点源污染。上边界选择浓度通量边界，下边界选择零浓度梯度边界。

模型参数选取：油罐泄漏时在未稀释状态下，土壤表层接触的初始浓度接近其密度值，泄漏量中仅 10% 能有效渗入土壤，取值为  $74\text{mg}/\text{cm}^3$ 。石油类纵向弥散系数取值为 19.5，自由水中扩散系数取值为 16.7。根据吸附解析的实验研究，采用 Herry 吸附模型模拟石油类的吸附动力学过程，吸附系数取值为 0，经验系数  $\beta$  取值为 1<sup>[1]</sup>。

模型剖分：在 HYDRUS-1D 软件中主要对包气带土层进行设定，模拟土层厚度设置为 300cm，模型剖分按 10cm 间隔，共 31 个节点。

观察点设置：在 HYDRUS-1D 的 Soil Profile-Graphical Editor 模块中对包气带土层进行设定，在预测目标层布置 5 个观察点，由上至下依次为 N1~N5，距模型顶端距离分别为 10cm、20cm、40cm、60cm、100cm。T1~T6 分别代表模拟时间 5d、10d、50d、100d、200d、365d。

## 5 模拟结果分析

由于模型预测得到的污染物浓度单位为  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ，需根据土壤体积含水率换算为溶质的单位质量含量：

$$M (\text{mg}/\text{kg}) = \theta C / \rho$$

其中： $\theta$  为土壤含水率，单位为  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ，取值为 0.25； $C$  为溶质浓度，单位为  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ； $\rho$  为土壤密度，单位为  $\text{kg}/\text{cm}^3$ ，根据本次土壤理化性质测试结果取值为  $0.38 \times 10^{-3}$ 。

### 5.1 不同包气带剖面深度处石油烃浓度随时间变化情况

经模型预测，储罐发生油品泄漏进入包气带后：

在不同包气带剖面深度处石油烃浓度预测结果见表 1 和图 1。

表 1 石油烃预测结果汇总表（N1-N5）

预测因子	观测点	观测点位于地表以下 (cm)	泄漏 365d 最大浓度 (mg/kg)	最大浓度出现时间 (d)	现状监测值 (mg/kg)	叠加值 (mg/kg)	GB36600-2018 第二类用地筛选值 (mg/kg)
石油烃	N1	10	39414	100	12	39426	4500
	N2	20	30967	102		30979	
	N3	40	19546	105		19558	
	N4	60	11730	116-117		11742	
	N5	100	4227	154		4239	

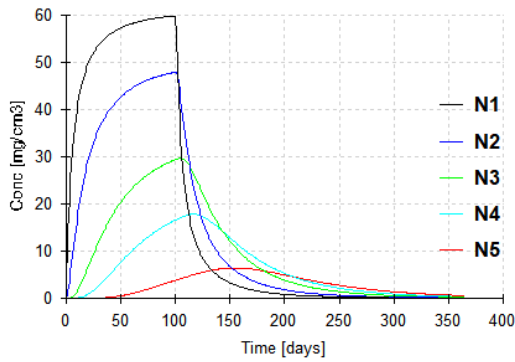


图 1 不同深度处土壤中石油烃浓度随时间变化曲线图

根据模拟结果可知，在油品储罐泄漏事故发生后，石油烃向下迁移形成垂向污染晕，污染晕锋面处的浓度随深度的加深而逐渐减小；随着石油烃不断下渗，污染物的累计速度未超过污染物随着土壤自净速度和容纳能力，土壤中污染深度不断增加，但石油烃浓度不断减小，泄漏事故主要影响范围控制在地表以下 100cm 范围以内。

### 5.2 不同时间包气带剖面上土壤中石油烃浓度随深度变化情况

不同时间土壤剖面中石油烃浓度预测结果见表 2 和图 2。

表 2 石油烃预测结果汇总表 (T1-T6)

预测因子	泄漏时间 (d)		泄漏污染控制深度 (cm)	该深度处的污染浓度 (mg/kg)	现状监测值 (mg/kg)	叠加值 (mg/kg)	GB36600-2018 第二类用地筛选值 (mg/kg)
石油烃	T1	5	30	822	12	834	4500
	T2	10	30	3420		3432	
	T3	50	70	2795		2807	
	T4	100	90	3781		3793	
	T5	200	80	3682	12	3694	4500
	T6	365	140	410		422	

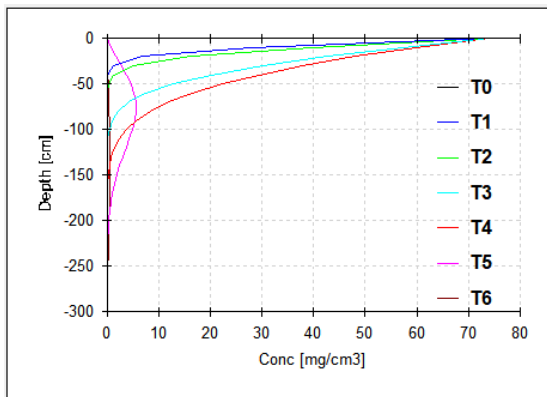


图 2 不同时间土壤剖面中石油烃浓度随深度变化曲线图

根据模拟结果可知，事故泄漏在 100d 内，土壤中石油烃浓度随剖面深度的增加而降低，地表处的污染浓度最大（源强值）。泄漏事故发生 10d 后，主要影响范围在地表以下 30cm 内；泄漏事故发生 50d 后，主要影响范围在地表以下 70cm 内；泄漏事故发生 100d 后，主要影响范围在地表以下 90cm 内。泄漏事故发生 200d-365d 后，石油烃无地表累积现象。初期 100d 内 (T1-T4) 主要由物理过程主导累积，浅部快速累积，污染缓慢下渗；中期 100d 内 (T4-T5) 主要由生物降解主导衰减，浅部降解清零，污染羽下移；后期

200d 后 (T5-T6) 出现多过程协同调控分布，峰值持续下移，深层残留增加。

## 6 结论

本文以湖南某通用机场建设项目为例，在撬装加油站区域防渗层出现破损等事故情况下，将石油烃的渗漏概化为点源污染。油罐泄漏时，在未稀释状态下，泄漏量中仅 10% 能有效渗入土壤，源强取值为 74mg/cm<sup>3</sup>，采用 HYDRUS-1D 软件建立数值模型，模拟石油烃在包气带中的运移规律。通过模拟结果可知，石油烃在粉土中的污染是“物理迁移(渗透+弥散)、生物降解、吸附作用”动态平衡的结果，生物降解是控制污染程度的关键过程，否则浅部浓度会持续累积并快速向深层渗漏；而粉土中微生物的存在，大幅降低了整体污染水平，但也导致污染羽向深部扩散的周期延长。

### 参考文献

- [1] 张鹤鹏.数值模型在石油开采产建项目土壤环境影响评价中的应用 中国化工贸易, 2021, 100-101.
- [2] 丁素玲.HYDRUS-1D 软件在土壤环境影响评价中的应用[J]. 环境影响评价, 2020, 42(4):62-65.
- [3] 董姝娟,蔡天洲,钱光阳,孟凡伟.基于 HYDRUS-1D模型研究石油烃污染物在土壤中的运移规律 化工管理, 2023, 35-37.