

基于主成分分析法油气田污染物迁移特征分析

王健宇¹,宋晶晶²,陈 蓓¹

(1. 重庆大学,重庆 400044;2. 重庆市计量质量检测研究院,重庆 401123)

摘要:为改善油气田开采环境,结合主成分分析法(Principal Component Analysis)与污染物迁移模型,对研究区的油气田开采过程中的污染物进行了分析。介绍了油气田开采产生污染物的研究背景,其次结合PCA对污染物中的主要成分进行了筛选,构建了污染物迁移模型。结果表明,本文中的主要污染物为石油类、酸、氯离子、氟离子和 COD(Chemical Oxygen Demand)、BOD(Biochemical oxygen demand),石油类所占比重最大,为 23.63%;石油类污染物在黑钙土中的迁移最广,直至土层厚度为 35 cm;石油类污染物在黑钙土中的迁移符合负指数规律;当酸液浓度在 1%、2%、3%、4% 时,氢离子在土壤中随深度的变化一致,土层厚度为 20 cm 时,11% 的酸液酸值高于低浓度土壤酸值;氯离子和氟离子的迁移深度变化基本符合负指数变化规律;低浓度的污染物比高浓度的污染物更早达到定值;石油类污染物在土壤中的迁移能力较弱;研究实验值与模拟值基本一致,研究成果良好。石油类污染物在土壤中的迁移能力较弱,酸性污染物对土壤有一定影响。

关键词:PCA;迁移模型;油气田;污染物;土壤

中图分类号:0622.1

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2022)03-0042-11

1 引言

油气田是单一局部构造单位所控制的同一面积内气藏、油藏和油气藏的总和,该处的油气指的是石油和天然气。中国有名的油气田包括大庆油田、辽河油田、任丘油田等。由于石油和天然气的存在,油气田在开采过程中往往容易对周遭的自然环境产生影响^[1]。Gao et al. (2018)发现了环境问题在工程开发中的重要性^[2],而本文研究中石油类和酸性污染物对环境的影响较大。油气田开采过程中的污染物主要由酸化压裂与试油两个过程产生^[3]。酸化压裂是通过酸液的溶蚀作用将油气田裂缝的壁面改变成凹凸不平的表面,使裂缝壁面在停泵卸压后不会完全闭合,以达到提高和恢复油井生产能力的目的,酸化压裂过程中的返排废液是主要的废水污染源^[4]。试油指的是通过测试各项物理性质,为油气田开发提供可靠依据的工艺过程。主要包括洗井、射孔、诱流以

及测试等,试油过程中产生的废水中含有大量原油和一些添加剂,对环境造成恶劣影响^[5]。油气田开采过程中污染物对环境的影响研究,对提高油气田环境保护事业的发展水平有着深远意义。

对于污染物的环境影响研究开展的较多^[6]。其中,对于污染物的主要污染成分评价较多采用主成分分析法(PCA)、污染指数法、半致死剂量法等^[7]。其他的常见评价法计算量较大,分析较为复杂,因此本文仍选择主成分分析对油气田开采过程中的主要污染物之间的关系进行研究。主成分分析法是一种统计学方法,通过将众多具有相关性的指标重新组合,获得一组新的互无关的综合指标来代替原指标^[8]。主成分分析法从数学角度阐述,是一种降维的数据处理技术,在计算油气田开采中产生的污染物的主成分时,将各大污染物作为代求因子,在此基础上建立各因子与其浓度之间的数学模型,并确定数学关系式,得出初始因子载荷矩阵与系数矩阵,最后得到污染物的方差贡献率与污染物类型^[9]。

收稿日期:2021-08-02;修回日期:2021-09-14

作者简介:王健宇(1995-),男,研究生在读,主要研究方向环境风险评价。Email:wangjl33@163.com。

通信作者:陈 蓓,Email:asaawjj1147@163.com。

油气田开采过程中产生污染物危害环境,污染物主要为试油试采废液以及压裂废液形成,以某研究区为例,研究该地的土壤环境状况与自然环境状况。本文在主成分分析法的基础上,运用 Statistical Product and Service Solutions 25.0 软件分析后,得到主要污染物,对油气田压裂试油废液对环境的主要危害进行评价;并结合油气田压裂试油废液的处置方式,分析污染物进入动植物体内、地表水、土壤以及地下水的方式;重点分析石油类污染物质在研究区各类土壤条件下的转化和迁移规律,构建污染物迁移模型,最后,对油气田压裂试油废液的迁移进行了分析。研究创新点在于结合数学模型即主成分分析模型与迁移模型,对油气田开采过程中的主要污染物的迁移规律进行了验证,并提出了一定的治理措施。本研究对促进油气田环境保护事业的发展有着重要意义。

2 研究方法

2.1 油气田污染物治理背景介绍

油气田开采过程中的两大重要工艺即压裂与试油试采过程中产生的污染物主要为石油类污染物^[10]。石油类污染物的主要构成为多环芳烃,多环芳烃是由碳化合物在温度高于 400 ℃,热解环化和聚合后的产物。木材、煤、石油、可燃性气体在不完全燃烧时易产生多环芳烃,多环芳烃在排入大气后经雨洗和沉降等途径到达地表,对地表水造成污染^[11]。多环芳烃在进入水环境后,易与多种物质发生物理化学反应,但最终会重新回到水中,难以去除^[12]。研究表明,多环芳烃为致癌有毒有机污染物^[13]。石油类污染物在水中的含量为微克级,因此对石油类污染物的监测较难,常规的 COD 等有机物监测指标不能完成对石油类污染物的监测^[14]。石油类污染物具有生物累积性,且难以降解、造成生物体中毒,该类污染物在转化迁移过程中,易被生物富集放大,造成浓度水平迅速增高,对生物体造成重大危害^[15]。

国外对于石油类污染物的污染现状、生态毒性、环境迁移转化行为、污染源控制、污染治理等方面进行了多项研究^[16]。石油类污染物的研究已成为环境工程、环境化学、预防医学、环境法学

等多学科交叉的前沿研究领域^[17]。国外目前对于石油类污染物的研究主要涉及石油类污染物的污染状况和污染物存在种类、石油类污染物的控制与消除方法、石油类污染物的筛选与判别以及石油类污染物的环境行为研究^[18]。中国对于石油污染物的监测研究起步较晚,从 20 世纪 70 年代开始,中国开始对石油类污染物进行研究^[19]。近年来,有机污染物在人体、土壤、水体、野生动物、农作物中被检出的报道逐渐增加,但相比于国外,中国对于石油类污染物的研究依然较少^[20]。目前,中国正在逐步增加针对石油类污染物治理的研究。

2.2 废液的产生过程

压裂酸化是将前置液以高于油藏基质允许的限速注入地层,使井筒压力提高,直到克服岩石抗张强度与地层压缩应力为止^[21]。岩石在达到屈服点后形成裂缝,使裂缝张开与延伸后注入酸液,使地层形成纵深通道^[22]。压裂过程中用到的压裂液分为乳化压裂液、泡沫压裂液、水基压裂液和油基压裂液。目前最常用的压裂液为水基压裂液^[23]。压裂过程中的返排废液组成复杂,包含原油、岩屑、粘土颗粒以及有机无机添加剂等污染物质。有机添加剂多为多环芳烃化合物与苯系衍生物,生物降解性较差^[24]。压裂酸化使用的酸液由氢氟酸与盐酸组成,腐蚀性强,在压裂过程中可能由于监管不当发生泄露,对土壤和地表水环境造成威胁^[25]。

试油试采是在试油的基础上进行针对油井的试验性生产,为油气田的开发打好基础。试油试采作业流程如图 1 所示。由图 1 可以看出,试油试采作业流程主要由试采目的、试采层系划分组合、试采规模、试采方式、试采时间、录取地质资料 6 项步骤构成。试采目的往往包括油气井的分布状况分析、合理开采方案的提出、储层污染状况分析等;试采层系划分组合分为不分层系和划分层析,不分层系的油井油层浅、井段不长、厚度较小,反之则划分层系;试采规模由油气储藏量的大小划分为大型、中型和小型;试采方式分为自喷井和非自喷井;试采时间由油气井的产量决定,高产井试采时间为 1~2 个月,低产井为 3~4 个月;录取地质资料阶段主要进行井中油气的各项测

量,包括井中静压、油气量、水量、井中各位置的压力曲线等。

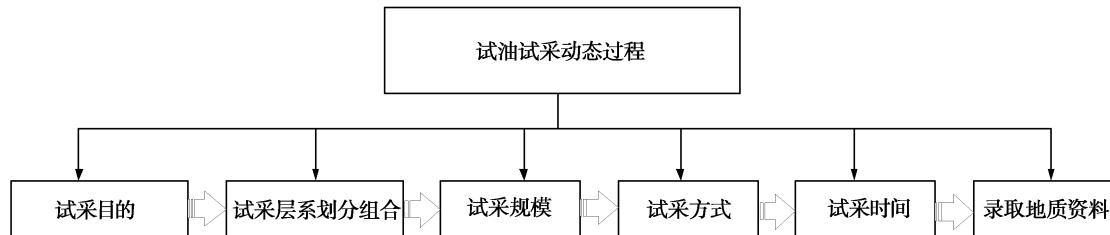


图 1 试油试采作业流程

Fig. 1 Operation flow of oil test and production test

2.3 废液中污染物组成分析

2.3.1 实验材料与分析项目

实验过程中用到的实验药品由哈尔滨化工试剂厂生产的重铬酸钾和硫酸亚铁铵,沈阳华东试剂厂生产的氢氧化钠,沈阳新兴试剂厂生产的硫酸,齐齐哈尔市北大化工试剂厂生产的硫酸钠,上海试剂一厂生产的无水硫酸钠,哈尔滨市新春化工厂生产的盐酸,实验药品规格为分析纯。试验过程中使用的实验仪器包括沈阳龙腾电子称量仪器有限公司生产的电子天平,上海第3分析仪器厂生产的721型分光光度仪,日本岛津生产的GC-2014C型气相色谱仪。

分析项目包括有机毒物、化学需氧量、无机污染物、重金属元素以及 pH 值。其中,有机毒物包括压裂试油液添加剂和石油类污染物,无机污染物包括 F^- 和 Cl^- ,重金属元素包括 Cr、Zn、Cu、Cd 和 Pb。针对化学需氧量采用重铬酸钾法进行试验;石油类污染物的测定采用仪器分析法(离心分离法)与化学分析法(紫外分光光度法);有机毒物的测定采用物理分析法,化学分析法以及仪器分析法(红外光谱法);无机污染物的测定采用氟离子选择电极法与银量法;重金属元素的测定采用仪器分析方法(原子吸收光谱法)。

2.3.2 主要污染物的确定

本文选取某油气田为研究对象,分析研究区的污染物状况。参考标准为 GB/T14848-93 中规定的相关标准排放值。压裂试油废液污染物评价指标包括石油类、酸、胶状物、重金属、交联剂、矿化度以及 COD 值共 16 项;对 16 项污染物进行序号标注,分别为 1~16;Yang et al. (2020) 提出

了监测数据可以提供可靠数据来源^[26],因此本文数据取自研究区压裂废液成分监测报告。采用 SPSS 25.0 对 17 项指标进行主成分分析,经验证,KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验系数为 $0.628 > 0.5$,适合主成分分析。标准化数据后,得到相关性系数矩阵与主成分贡献率,最后初始因子载荷矩阵中的数值除以主成分相对应的特征值平方根,得到主成分载荷矩阵。

2.3.3 主要污染物对环境的危害评价

压裂试油废液中的污染物对人体、动植物的影响巨大。石油类污染物由于挥发性强,溶解度较低,因此在土壤中的迁移能力较弱,对土壤的污染严重,且石油类污染物毒性较强,易造成动人体和植物中毒^[27]。石油类污染物在泄漏后进入地下水系统,会对水体与土壤环境造成影响,并有可能迁移至湖泊河流中,将污染物带向海洋^[28]。不仅如此,石油类污染物在湿地中也会发生迁移^[29]。

废液中的酸类物质对环境也有一定影响,酸类物质主要是氢氟酸和盐酸^[30]。酸液首先对植物及土壤产生影响,对土壤的影响表现为对土壤中群落的影响^[31]。氯离子有较强的可被金属吸附性,易与金属形成氯化物,造成金属表面出现孔蚀刻^[32]。氟离子有一定毒性,易对生物体造成危害。

2.4 污染物迁移规律的分析

以研究区土壤与典型地区为模拟条件,该地区土壤类型有黄土、黑钙土与碱土。在此进行室内土柱实验模拟压裂试油废液中污染物迁移试验,具体装置构造见图 2。

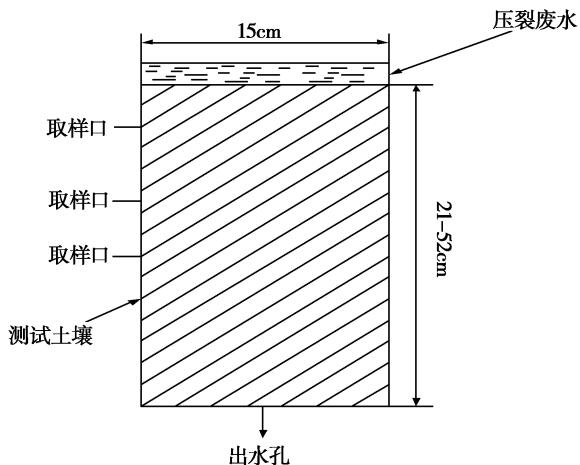


图2 土柱试验装置图

Fig. 2 Soil column experimental device drawing

从图2中可以看出,试验所用土柱直径为15 cm,高度为21~52 cm,压裂废水从试验土壤顶部开始渗透,最后从下方的出水孔流出,土柱取样点为上、中、下三个部分。整个试验模拟现实中废液对土壤的污染过程。

研究结合油气田压裂试油废液处置方式,对污染物进入水系统、土壤、动植物体内的方式进行研究,石油类污染物在研究区各类土壤中的转化与迁移。油田的主要污染物对环境的污染方式为吸附和扩散。一般的油田压裂试油废液储池为低于地表深度20~50 cm左右的区域,因此本研究采用30 cm储藏池为研究对象,对土壤环境受废液的影响进行评价。具体扩散方式如图3所示。

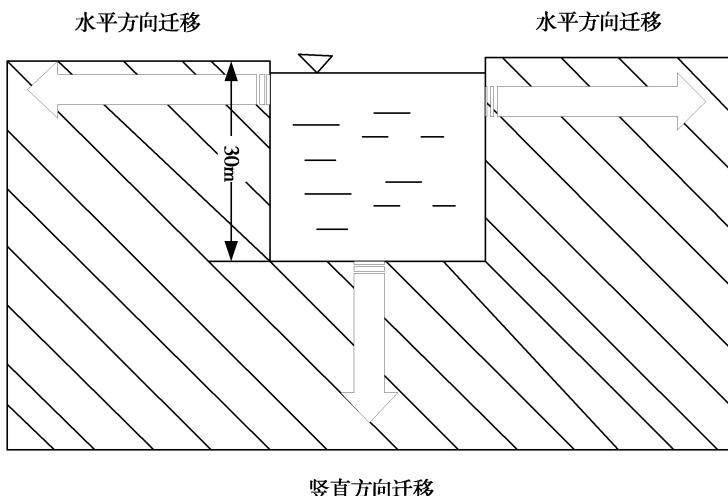


图3 废液污染物在土壤中的迁移方式

Fig. 3 Migration mode of pollutants in soil

由图3可以看出,储藏池中的污染物的迁移方式主要为竖直方向和水平方向上的浓度差扩散和垂直方向的重力扩散。

2.4.1 石油类污染物随土壤深度迁移规律研究

试验土柱的3种土壤填充比例按照研究区的土壤密度进行,该地区的土壤厚度在21~52 cm,土壤密度数据、厚度数据以及种类数据均来源于《中国土壤数据库》和该地区典型土壤背景值。在图2的试验土柱中装入 1.237 g/cm^3 碱土、 1.155 g/cm^3 黄土和 1.025 g/cm^3 黑钙土,土柱高度为50 cm,直径为15 cm。在石油污染源强度20 000 mg/kg条件下进行试验,得到不同土壤石油含量随土层深度的变化结果。对3种土壤中,

石油类污染物发生最大迁移深度的土壤进行进一步分析。石油污染源强度确定来自于该地区油田压裂废液污染物数据。在该试验土柱中加入该类土壤,土柱高度为50cm,直径为15 cm,石油污染物发生最大迁移量的土壤为黑钙土,因此密度取 1.025 g/cm^3 。分别取含有石油污染物浓度为20 000 mg/kg和26 000 mg/kg的废液1.60 L(相当于30 cm深压裂试油废液储池中的液体的污染强度),淋滤于土柱上,直至土柱底部不再有液体流出为止,在取样口取土样进行分析。

2.4.2 酸性污染物随土壤深度迁移规律研究

在实验土柱中加入 1.025 g/cm^3 的黑钙土,土柱高度为50 cm,直径为15 cm。将1.69 L,含有

酸浓度分别为1%、2%、3%、4%和11%的废液(相当于30 cm深压裂试油废液储池中的液体的污染强度)淋滤于土柱上,直至土柱底部不再有液体流出为止,在取样口取土样进行分析其酸度值。

Cl^- 随土壤深度迁移的实验方法为在实验土柱中加入 1.025 g/cm^3 的黑钙土,土柱高度为50 cm,直径为15 cm。将1.69 L,含有 Cl^- 浓度分别为2%、4%、9%的废液(相当于30 cm深压裂试油废液储池中的液体的污染强度)淋滤于土柱上,直至土柱底部不再有液体流出为止,在取样口取土样进行分析 Cl^- 含量。

F^- 随土壤深度迁移的实验方法为在实验土柱中加入 1.025 g/cm^3 的黑钙土,土柱高度为50 cm,直径为15 cm。将1.69 L,含有 F^- 浓度分别为1%、2%、3%、4%、5%的废液(相当于30 cm

深压裂试油废液储池中的液体的污染强度)淋滤于土柱上,直至土柱底部不再有液体流出为止,在取样口取土样进行分析 F^- 含量。

2.4.3 石油类迁移模型数值模拟分析

石油类污染物在进入土壤表层后发生两个阶段的迁移,即非饱和带迁移与稳定迁移。非饱和带迁移阶段的石油污染物主要受到重力的影响,发生垂直向下迁移;与此同时,毛细管力的作用使污染物发生横向迁移,此时,渗漏核心出现油浸带。稳定阶段,石油类污染物迁移程度微小,基本不迁移,以地下水的通常深度,污染物在达到地下水位以前会达到稳定状态。本文基于以上内容,针对石油类污染物在土壤中的污染范围构建模型。石油类污染物在达到稳定阶段后主要存在于土壤孔隙内,根据该原理构建稳态数学模型。迁移过程由图4所示。

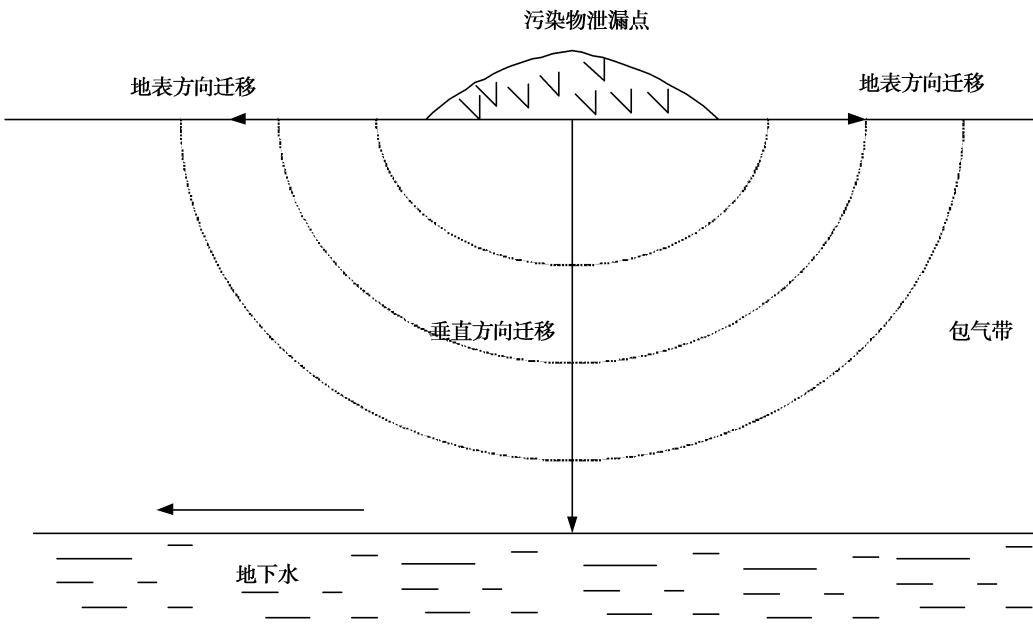


图4 石油类污染物迁移过程

Fig. 4 Migration process of petroleum pollutants

由图4可以看出,石油类污染物在地下水上方的包气带附近达到稳定状态,迁移方向有沿地表方向迁移与垂直方向迁移。

基于以上内容,构建非饱和带污染物迁移和水运动耦合模型。首先进行水动力模型的构建,其次构建污染物迁移模型,再将两个模型联合求解,最终得到土壤中污染物的浓度分布。非饱和

水运动模型可由公式(1)进行表达。

$$\frac{\partial h}{\partial t} C = \frac{\partial}{\partial x} \left| H_{xx} \frac{\partial h}{\partial t} \right| + \frac{\partial}{\partial z} \left| H_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right| + \frac{\partial K_{zz}}{\partial z}, \quad (1)$$

公式(1)中, H_{xx} 为横向水力传导系数, H_{zz} 为纵向水力传导系数, C 为比水容量。

$$h_{t=0} = h_0(x, z), \quad (2)$$

公式(2)为初始条件,其中, h 为基质势, h_0 为初始值。

$$h_t = h_2(x, z, t), (x, z) \in r_1, \quad (3)$$

公式(3)为 Dirichlet 边界条件, h_1 为基质势边界条件, r_1 为 Dirichlet 边界。

$$H \frac{\partial h}{\partial n} |_{r_2} = q(x, z, t), (x, z) \in r_2 \quad (4)$$

公式(4)为 Neumann 边界条件, q 为通量边界条件, n 为边界外法线向量, r_2 为 Neumann 边界。

非饱和带中石油污染物的迁移模型表达见公式(5),

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} R d &= \frac{\partial}{\partial x} \left| J_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right| + \frac{\partial}{\partial z} \left| J_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right| - \frac{\partial (v_x c)}{\partial x} - \frac{\partial (v_z c)}{\partial z} \\ &+ \left| \frac{\partial \theta}{\partial t} - \lambda \theta R d \right| c \pm M, \end{aligned} \quad (5)$$

公式(5)中, Rd 为滞留因子, c 为污染物浓度, J_{xx} 为横向弥散系数, J_{zz} 为纵向弥散系数, v_x 和 v_z 为横向与纵向实际平均流速, 由水运动模型确定, θ 为土壤含水率, λ 为污染物的衰减系数, M 为源汇项。

$$c_{t=0} = c_0(x, z), \quad (6)$$

公式(6)为初始条件公式, c_0 为初始条件。

$$c_{r_1} = c_1(x, z, t), (x, z) \in r_1, \quad (7)$$

公式(7)为 Dirichlet 边界条件公式, c_1 为浓度边界条件, r_1 为 Dirichlet 边界。

$$-D \frac{\partial c}{\partial n} |_{r_2} = f_1(x, z, t), (x, z) \in r_2, \quad (8)$$

公式(8)为 Neumann 边界条件, f_1 为弥散通量边界条件, f_2 为对流弥散通量边界条件, n 为边界外法线向量, r_2 为 Neumann 边界。

$$\left| v c - D \frac{\partial c}{\partial n} \right|_{r_3} = f_2(x, z, t), (x, z) \in r_3, \quad (9)$$

公式(9)为 Cauchy 边界条件公式, r_3 为 Cauchy 边界。

本研究对 10 年和 20 年间, 石油污染源强度 10 000 mg/kg 的污染物位移深度和石油含量的关系进行了分析, 并对研究区 5 cm 深度的土层石油含量随时间的变化进行了研究, 最后将石油污染源强度 18 000 mg/kg 和 19 000 mg/kg 废水在土柱上试验, 置于 25 °C 空气中 15 天, 对于结果进行绘图, 设置实验值与模拟值进行比较。本实验中的检测石油含量的厚度, 石油污染源强度和放置时间均来自以往研究^[33]。

2.4.4 其他类污染物迁移数值模拟分析

油气田开采过程中的其他类污染物主要为

H^+ 、 Cl^- 和 F^- , 由于这 3 种离子在土壤中的迁移机理相似, 因此可以使用溶质运移理论进行数学模型的构建。

溶质迁移使用一维对流—弥散方程构建模型, 具体表达见公式(10)。

$$R \frac{\partial c}{\partial t} = P \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (10)$$

公式(10)中, c 为溶质浓度, x 为位置, t 为时间, R 为阻滞因子, V 为孔隙水流速, P 为扩散—弥散系数。研究初始条件为 $c = 0, t = 0, 0 < x < L; c = c_0, x = 0, 0 < t < t_p; c = 0, x = 0, t > t_p, L$ 为土柱长度, c_0 为外加溶液浓度, t_p 为溶质输入脉冲时间。

本文在构建模型的基础上, 对 5% 的 H^+ 、1% Cl^- 和 3% F^- 的迁移规律进行了探索, 对实验曲线与模拟曲线进行对比。

3 油气田开采过程中的污染物对环境的影响结果分析

3.1 主成分分析法结果分析

压裂试油过程中废液污染物的特征值与贡献率结果见图 5。

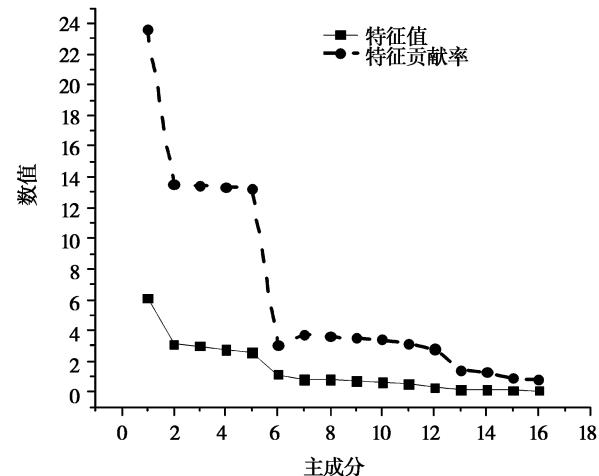


图 5 特征值与贡献率结果

Fig. 5 Eigenvalues and contribution rate results

由图 5 可以看出, 主成分分析中前 5 项的特征值贡献率累计达到 80%, 因此主要污染物为石油类、酸、氟离子、氯离子和 COD, 第一主成分即石油类所占比重最大, 为 23.63%。COD 主要是

污水中污染物对整体环境的影响,污染特性为各种污染物综合作用的结果。因此本文主要对污染物中的石油类和酸液进行分析研究。基于图5内容,构造主成分载荷矩阵,得到结果为该5项污染指标质量浓度均呈现正相关。

3.2 石油类污染物迁移结果分析

石油污染源强度 $20\ 000\text{mg/kg}$ 条件下,不同土壤石油含量随深度的变化如图6所示。

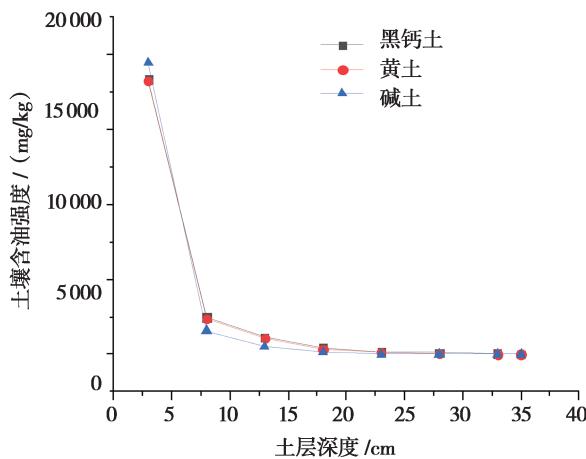


图6 不同土壤石油含量随深度的变化

Fig. 6 Changes of oil content in different soils with depth

由图6可以看出,石油类污染物在黑钙土中的迁移最广,直至土层厚度为35 cm,污染物浓度从 $18\ 365\text{mg/kg}$ 降到0;黄土中的污染物迁移深度在 $28\sim33\text{cm}$ 附近,污染物浓度从 $18\ 265\text{mg/kg}$ 降到0;碱土中的污染物迁移深度最小,迁移深度在20 cm附近,污染物浓度由 $19\ 453\text{mg/kg}$ 降至最低。分析可知,由于碱土中的碱性物质与污染物中的 H^+ 发生了中和反应,迁移运动因此停止。

由于黑钙土中的污染物迁移最大,因此此处对 $20\ 000\text{mg/kg}$ 和 $26\ 000\text{mg/kg}$ 的废液在黑钙土中的迁移进行分析,见图7所示。

由图7可以看出,石油类污染物在黑钙土中的迁移符合负指数规律, $20\ 000\text{mg/kg}$ 和 $26\ 000\text{mg/kg}$ 的废液都在33 cm厚度附近的土层浓度降至0。可见土壤对石油类污染物的截留能力较强,绝大多数石油类污染物被截留在表层土壤中,黑钙土为研究区3种土壤中污染物迁移程度最大的土壤,然而,对于石油类污染物的截留能力依然很强,由此可见,土壤对于污染物的扩散起

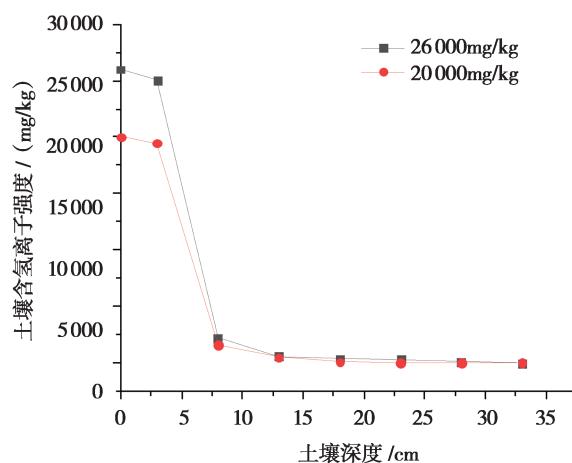


图7 石油类污染物在黑钙土中的迁移情况

Fig. 7 Migration of petroleum pollutants in chernozem

到重要作用。

3.3 酸性污染物迁移结果分析

H^+ 在土壤中随深度的迁移情况如图8所示。

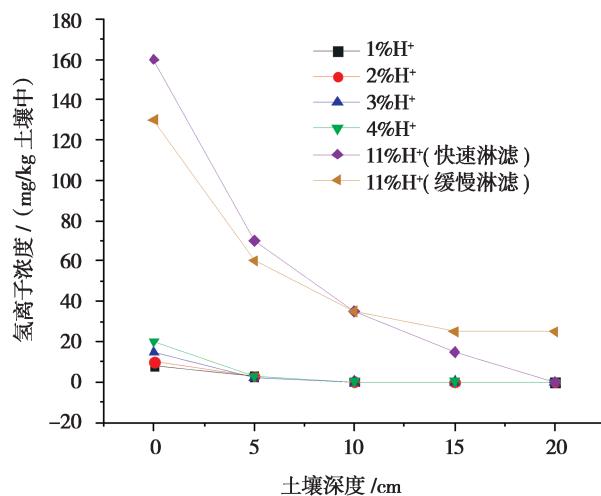


图8 H^+ 在土壤中随深度的迁移情况

Fig. 8 Migration of H^+ in soil with depth

由图8可以看出,当处在低浓度时,即酸液浓度在1%、2%、3%、4%时,氢离子在土壤中随深度的变化一致,4%浓度的酸液迁移程度高于其他低浓度酸液,4%浓度的酸液在20 cm的土层厚度处的氢离子浓度为 0.1mg/kg 。土层厚度为20 cm时,11%的酸液酸值高于低浓度土壤酸值,11%的酸液在快速淋滤状态下比缓慢淋滤快一步到达定值。

Cl^- 在土壤中随深度的迁移情况见图9。

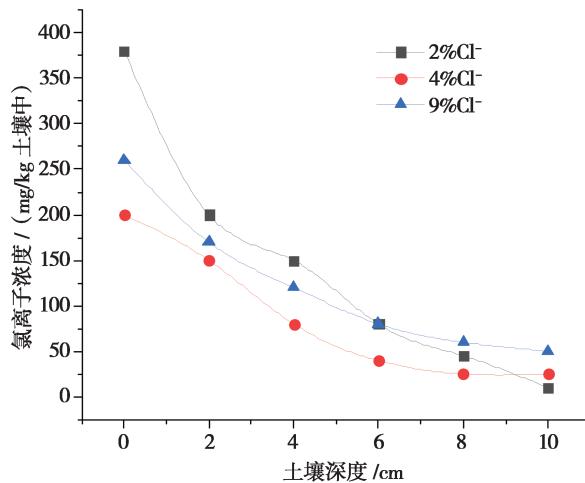


图9 Cl^- 在土壤中随深度的迁移情况

Fig. 9 Cl^- migration in soil with depth

从图9可以看到,2%、4%、9% 3种浓度下的氯离子在土壤中随深度的迁移状态基本一致。在土壤厚度为0~10cm的区间内,含氯离子浓度2%的废液中的氯离子浓度380 mg/kg降至10 mg/kg,含氯离子浓度4%的废液中的氯离子浓度200 mg/kg降至25 mg/kg,含氯离子浓度9%的废液中的氯离子浓度2 600 mg/kg降至50 mg/kg。氯离子浓度变化情况基本符合负指数规律变化。

F^- 在土壤中随深度的迁移情况如图10所示。

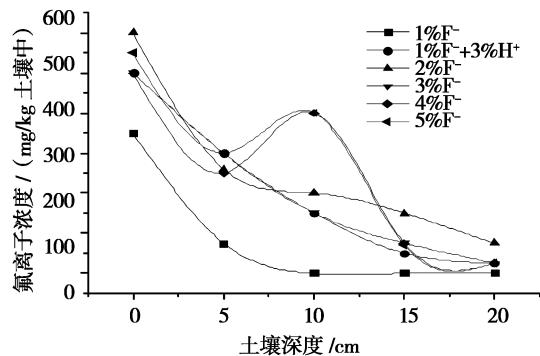


图10 F^- 在土壤中随深度的迁移情况

Fig. 10 F^- Migration with depth in soil

由图10可以看出,1%浓度下的氟离子迁移深度受到酸浓度的影响,添加3%氢离子的氟离子迁移深度增加,最高达到225 mg/kg,1%、2%

和3%浓度下的氟离子迁移深度变化基本符合负指数变化规律。随着氟离子浓度的增加,土壤吸附的氟离子达到平衡,出现极值,4%和5%浓度的氟离子极值出现在土壤深度为5 cm时,为250 mg/kg;分析原因可知,氢氟酸在土壤表面与土壤中的硅酸盐反应,土壤表面出现氟离子浓度最大现象;深度增加,负离子浓度继续减小,由于反应产生了粘性物质,当土层深度进一步增加后,氟离子向下移动受到粘性物质的阻碍,因此0~5 cm氟离子浓度减小;5 cm后,土壤对氟离子的吸附增强,最后达到饱和,即图10中4%和5%浓度的氟离子在10 cm处达到饱和,为400 mg/kg。

3.4 石油类迁移模型数值模拟结果分析

石油类污染物运移深度与石油含量的关系如图11所示。

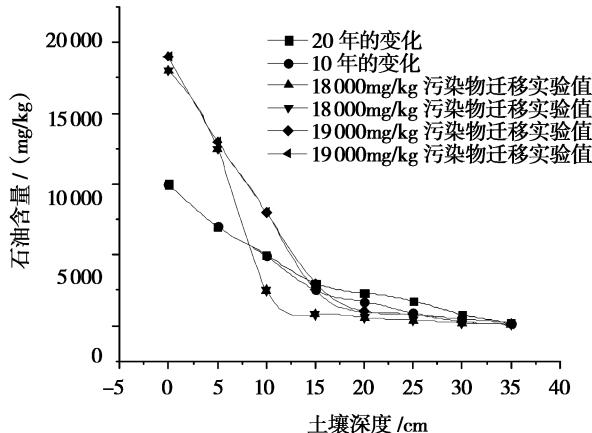


图11 石油类污染物运移深度与石油含量的关系

Fig. 11 The relationship between migration depth of petroleum pollutants and petroleum content

由图11可以看出,20年与10年间石油类污染物随土壤的变化形势一致,可见石油类污染物在土壤中的迁移能力较弱。18 000 mg/kg 的污染物与19 000 mg/kg 的污染物的实验值与模拟值基本一致。18 000 mg/kg 的污染物在土层深度为30cm时率先到达200 mg/kg,而同一土层厚度,19 000 mg/kg的污染物的石油含量为300 mg/kg,低浓度的污染物比高浓度的污染物更早达到定值。

石油类污染物含量与土壤深度随时间的变化关系由图12所示。

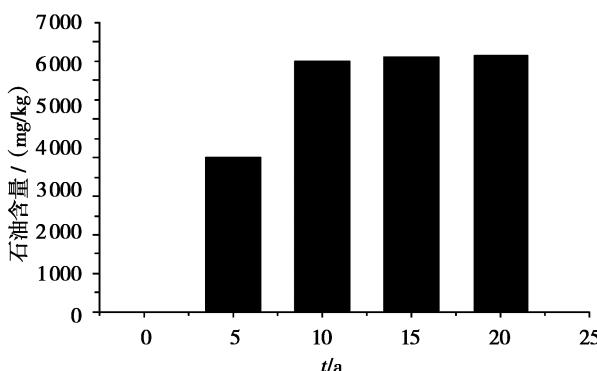


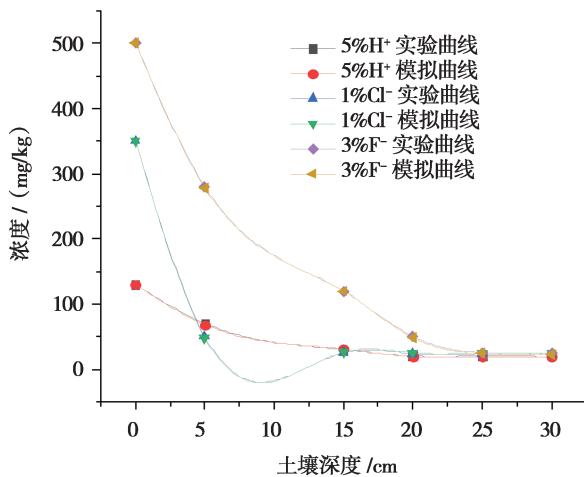
图 12 5 cm 深度土壤石油含量随时间变化

Fig. 12 Variation of oil content at 5 cm soil with time

由图 12 可以看出,石油类污染物主要聚集在 5~25 cm 的土层厚度之中,石油含量在 0~5 cm 范围内迅速升高至 4 000 mg/kg,并在 15 cm 时达到 6 600 mg/kg。研究区的地下水埋深为 5~7 m,图 12 中的数据与地下水埋深相差较大,可见石油类污染物对地下水的影响比较小,这与本次研究的监测结果基本一致,石油类污染物在土壤中的迁移能力较弱。

3.5 其他类污染物迁移模型模拟结果分析

其他类污染物中, H^+ 、 Cl^- 和 F^- 在土壤中的迁移规律如图 13 所示。

图 13 H^+ 、 Cl^- 和 F^- 在土壤中的迁移规律Fig. 13 Migration of H^+ , Cl^- and F^- in soil

从图 13 可以看出,5% 的氢离子的实验值与模拟值基本一致。在 0~35 cm 的土层中的浓度变化从 130 mg/kg 降至 19 mg/kg;1% 的氯离子实

验值与模拟值较为一致,在 0~35 cm 的土层中的浓度变化从 350 mg/kg 降至 24 mg/kg;3% 的氟离子实验值与模拟值同样一致,在 0~35 cm 的土层中的浓度变化从 500 mg/kg 降至 23 mg/kg。可见本次研究实验值与模拟值基本一致,研究结果良好。

4 结 论

通过介绍油气田开采中污染物产生的过程与现阶段的研究方法,基于主成分分析法对油气田开采中的主要污染物进行了筛选,得到了 5 种主要污染物;分别是 COD、酸、氟离子、氯离子和石油类污染物,并研究分析了石油类污染物和酸液污染物对环境的影响与解决方法。在此基础上,运用实验室模拟的方法,分析了油气田开采过程中污染物的迁移情况。结果显示研究区地下水的影响较少,在土壤中的迁移能力也较弱,而酸性污染物对土壤有一定影响。由于研究区设置单一,本文的结论普适性较弱,后续研究中,应设置较多的研究对象,使研究结果更加全面。

参考文献:

- [1] Yu C,Wang H,Wu Z X,et al. Analytical Solution for Pollutant Diffusion in Soils with Time-Dependent Dispersion Coefficient [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19 (10) : 04019109.
- [2] Gao X,Zhao S C,Shao Y B. An analysis of the current status and countermeasures of bike-sharing in the background of Internet[C]//2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS). IEEE,2018:469~472.
- [3] Pagnin L,Wiesinger R,Koyun A N,et al. The Effect of Pollutant Gases on Surfactant Migration in Acrylic Emulsion Films: A Comparative Study and Preliminary Evaluation of Surface Cleaning[J]. Polymers,2021,13 (12) :1941.
- [4] Guo S S,Wu H,Tian Y Q,et al. Migration and fate of characteristic pollutants migration from an abandoned tannery in soil and groundwater by experiment and numerical simulation[J]. Chemosphere,2021(271) :129552.
- [5] Lin Q B,Song X C,Fang H,et al. Migration of styrene and ethylbenzene from virgin and recycled expanded polystyrene containers and discrimination of these two kinds of polystyrene by principal component analysis[J]. Food Additives & Contaminants:Part A,2017,34 (1) :126~132.
- [6] Li Z Q,Xue Y G,Li S C,et al. Rock burst risk assessment in

- deep-buried underground caverns; a novel analysis method [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(11): 86–95.
- [7] Toshihide I, Takayuki S, Hiroyuki Y, et al. Color Appearance Evaluation of Different Light Sources by Principal Component Analysis [J]. Journal of Science and Technology in Lighting, 2019(42): 5–13.
- [8] Chen G B, Yuan H Y. Effects of carbonnanomaterials on the migration and fate of organic pollutants in the ecological environment [J]. Ferroelectrics, 2021, 570(1): 206–217.
- [9] Du Z H, Lin X. Particle Tracking Random Simulation of Pollutant Migration and Diffusion [J]. E3S Web of Conferences, 2021(257): 03049.
- [10] Gao L J. Study on migration and change of petroleum pollutants in soil and pollution evaluation with data mining technology [J]. E3S Web of Conferences, 2021(231): 03003.
- [11] Wang L Q, Wang Y. Design of Simulation System for Dynamic Diffusion of Marine Pollutants under Continuous Inversion [J]. Journal of Coastal Research, 2019(98): 129–132.
- [12] Ma T Y, Feng L, Wang H, et al. Analysis of near wall combustion and pollutant migration after spray impingement [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019(141): 569–579.
- [13] Sun C, Li C Y, Liu JJ, et al. First-Principles Study on the Migration of Heavy Metal Ions in Ice-Water Medium from Ulanshui Lake [J]. Water, 2018, 10(9): 1149–1149.
- [14] Mohamed H. A Model for Subsurface Oil Pollutant Migration [J]. Transport in Porous Media, 2017, 120(2): 373–393.
- [15] Hu F Y, Hao C X, et al. Application Research of Big Data Analysis Technology in Oil and Gas Field Development [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1578(1): 012033.
- [16] Yu T, Zhang X F, Wang F, et al. Optimizing the Teaching Content of “Introduction to Environmental Engineering” in Petrochemical Fields in Institutions of Higher Education [J]. International Journal of Social Science and Education Research, 2021, 4(3): 202–206.
- [17] Wang Z S, Li H N, Song G B. Aeolian Vibration Control of Power Transmission Line Using Stockbridge Type Dampers — A Review [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021, 21(01): 14530.
- [18] Zhang L, You Y, Yan Z T, et al. Analysis of Influencing Factors of the Ice Shedding Vibration on Iced Transmission Lines [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632(4): 042035.
- [19] Viktor R C, Denis I M. Management of development and conservation of oil and gas fields [J]. E3S Web of Conferences, 2020(219): 02002.
- [20] Amir M S L. An Intelligent Model for Estimating Relative Permeability in the Abu-Sennan Oil and Gas Fields, Southwestern Egypt [J]. Pure and Applied Geophysics, 2019, 176(10): 4349–4361.
- [21] Kuznetsov O L, Chirkin I A, Arutyunov S I, et al. Seismic studies of the unevenness of open fracturing and inhomogeneity of the fluid saturation in the geological environment for optimal development of oil and gas fields [J]. Georesursy, 2018, 20(3): 206–216.
- [22] Yuan S Y, Wang Q. New progress and prospect of oilfields development technologies in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 698–711.
- [23] Khudheir M. Radiological Risk Assessment of Oil waste in the Oilfields at Zubair district of Basrah [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1818(1): 012233.
- [24] Rastmanesh F, Shalbaf F, Moradi R, et al. Health risk assessment of heavy metals in Ahvaz oilfield using environmental indicators [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020(17): 1–10.
- [25] Wójcik M, Kostowski W. Environmental Risk Assessment for Exploration and Extraction Processes of Unconventional Hydrocarbon Deposits of Shale Gas and Tight Gas: Pomeranian and Carpathian Region Case Study as Largest Onshore Oilfields [J]. Journal of Earth Science, 2020, 31(1): 215–222.
- [26] Yang H Q, Chen X, Zhang L, et al. Conditions of hydraulic heterogeneity under which Bayesian estimation is more reliable [J]. Water, 2020, 12(1): 160.
- [27] Abbas M, Faisal K, Sohrab Z, et al. Dynamic risk assessment of reservoir production using data-driven probabilistic approach [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020(184): 106486–106486.
- [28] Shao B, Luo J, He M, et al. Ecological risk assessment at the food web scale: A case study of a mercury contaminated oilfield [J]. Chemosphere, 2020(260): 127599.
- [29] Silva L M R, Teixeira A P, Soares G C. A methodology to quantify the risk of subsea pipeline systems at the oilfield development selection phase [J]. Ocean Engineering, 2019(179): 213–225.
- [30] Chang Y J, Wu X F, Chen G M, et al. Comprehensive risk assessment of deepwater drilling riser using fuzzy Petri net model [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018(117): 483–497.
- [31] Øystein A, Eric P F, Hans P L, et al. A Comparison of FEP-analysis and Barrier Analysis for CO₂ Leakage Risk Assessment on an Abandoned Czech Oilfield [J]. Energy Procedia, 2017(114): 4237–4255.
- [32] Zuo X C, Li C L, Zhang J L, et al. Geochemical characteristics and depositional environment of the Shahejie Formation in the Binnan Oilfield, China [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2020, 17(3): 539–551.
- [33] Chen T S, Xue L K, Zheng P G, et al. Volatile organic compounds and ozone air pollution in an oil production region in northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(11): 7069–7086.

Analysis of Pollutant Migration Characteristics in Oil and Gas Fields Based on Principal Component Analysis

WANG Jian-yu¹, SONG Jing-jing², CHEN Bei^{1*}

(1. Chongqing University, Chongqing, 400044, China;

2. Chongqing Institute of Metrology and Quality Testing, Chongqing, 401123, China)

Abstract: In order to improve the exploitation environment of oil and gas fields, this paper analyzes the pollutants in the exploitation process of oil and gas fields in the study area by combining Principal Component Analysis and pollutant migration model. This study introduces the research background of pollutants produced by oil and gas field exploitation. Secondly, the main components of pollutants are screened by PCA, and the pollutant migration model is constructed. The results show that the main pollutants in this paper are petroleum, acid, fluoride ion, chloride ion, COD (Chemical Oxygen Demand), BOD (Biochemical oxygen demand), and petroleum accounts for the largest proportion, accounting for 23.63%. Petroleum pollutants migrate most widely in chernozem until the thickness of soil layer is 35cm;. The migration of petroleum pollutants in chernozem conforms to the negative exponential law. When the acid concentration is 1%, 2%, 3% and 4%, the changes of hydrogen ions in soil are consistent with the depth. When the soil thickness is 20cm, the acid value of 11% acid solution is higher than that of low concentration soil. The migration depth of chloride ions and fluoride ions basically conforms to the negative exponential change rule. Low concentration pollutants reach the fixed value earlier than high concentration pollutants; The migration ability of petroleum pollutants in soil is weak; The experimental values of this study are basically consistent with the simulated values, and the research results are good. The migration ability of petroleum pollutants in soil is weak, while acidic pollutants have certain influence on soil.

Key words: PCA; Migration model; Oil and gas fields; Pollutants; Soil