DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.03.009
李颖, 梁康, 娄华君, 等. 滨海地区石化污染事故对区域水环境影响的模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 48-54. LI Ying, LIANG Kang, LOU Hua-jun, et al. Modeling of impact of petrochemical pollution accidenton regional water environment in a coastal zone[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 48-54. (in Chinese)

滨海地区石化污染事故对区域水环境影响的模拟

李 颖[1], 梁 康[2], 娄华君[2], 辛 展[1], 张 征[1]

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为了解大连某半岛内石化事故对区域地下水环境的污染程度, 选取对居民区饮用水源有影响的区域建立污染预测模型, 分析了事故情景下石油类污染物的空间和时间变化及其对地下水环境和邻近海域造成的影响。结果表明, 泄露事故对地下水的污染范围大、时间长, 造成的污染严重; 场地污染物在地下水含水层中迁移扩散 35 年后移出场地进入海域, 对海洋生态环境产生危害。研究结果可为该地区水环境保护提供依据。

关键词: 半岛; 水质; 石化事故; 地下水; 海域; 数值模拟; 溶质运移

中图分类号: X523 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2016)03-0048-07

Modeling of impact of petrochemical pollution accidenton regional water environment in a coastal zone

LI Ying[1], LIANG Kang[2], LOU Hua-jun[2], XIN Zhan[1], ZHANG Zheng[1]

(1. *Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*))

Abstract: Focusing on a certain peninsula in Dalian where petrochemical accidents occurred frequently, this paper illustrated its current regional water environment contamination through the assessment of its groundwater quality. Additionally, with the establishment of contamination prediction model applied to the area where the water resources that residents used had been polluted, this research predicted temporal and spatial changes of petroleum pollutants and their effect on groundwater environment and adjacent sea area. The results indicated that the polluted groundwater in consequence of the accidents of oil leakage had the following features: the polluted area was comparatively large, the duration of pollution was long, and the situation of pollution was serious. The pollutants in that site would remove to the sea area after 35 years according to the simulation results, which endangered the marine ecological environment. Above all, the results of this research could provide a scientific basis and technological support for water environment conservation of this area.

Key words: peninsular; water quality; petrochemical pollution accident; groundwater; sea area; numerical simulation; solute transport

随着我国经济社会的发展, 石化工业已成为支撑国民经济持续健康发展的重要力量。然而, 石化行业通过提供燃料、基本原料等方式保障国民经济各行业生产发展的过程中, 大多涉及高温、高压、有毒有害物质, 使得环境面临着火灾、爆炸以及有毒、有害物质泄露等环境风险[1]。近年来石化企业事故频频发生, 不仅对邻近的居民构成生命健康威胁, 也对环境产生严重的危害[2-8]。

考虑到运输、取水和排污方面的优势, 许多石化企业选择沿海地区(如辽宁、山东、浙江、福建和广东等省)作为石化基地。由于半岛的特殊地理位置, 海水与区域地下水有着密切的水力联系, 污染事故对

收稿日期: 2015-12-12 修回日期: 2016-03-16 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1054.001.html
基金项目: 国家重点基础研究发展计划"973"项目(2010CB428805)
Fund: The Development Plan of National Key Basic Research—973 Project(2010CB428805)
作者简介: 李 颖(1990-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 主要从事环境监测与评价方面的研究。E-mail: liyingeve@163.com
通讯作者: 娄华君(1956-), 男, 山东济南人, 研究员, 博士, 主要从事水资源与环境方面的研究。E-mail: louhj@igsnrr.ac.cn

地下水造成的污染危害可能会在很短的时间内通过水力传导造成邻近海域生态环境的污染破坏。

居民用水安全与海水质量受岛上石化企业的影响较大,因此,本文以大连某半岛为研究区,对该半岛进行地下水水质评价,初步掌握其受污染情况,通过建立地下水流数值模型与污染物运移模型,定量分析研究区内突发事故情景,对地下水环境和邻近海域的影响程度,可以为该地区水环境保护和管理提供科学依据,并且对地区经济社会发展也具有重要意义。

1　研究区概况

1.1　自然地理概况

本文研究区位于大连市东北部,半岛内集中了石化园区和临港化工园区,研究区范围以海岸线作为研究区东北、东南、西南的自然边界,西北部以距工业园区较近、受影响较大的居民区为边界,研究区面积约 80.7 km^2。本区濒临黄海,属北温带大陆性季风气候,又具有海洋性气候的特征,年平均温度 10.4 ℃,多年平均降水量 687.1 mm,降水多集中在 7 月– 9 月,约占全年 60% 左右,多年平均蒸发量 1 603.3 mm。区内无大河流,仅有小型的季节性河流直接入海。区域水资源匮乏,还面临海水入侵等问题。

1.2　水文地质条件

半岛场地地貌成因类型为剥蚀堆积地形,形态类型为山前斜平面,由坡洪积层组成,下伏基岩为板岩、石英石,植被发育,微地貌有冲沟,场地内无不良地质现象。研究区范围内多为山地,自然地形为缓坡丘陵地,岩土条件较简单。除沿海分布有特殊性土(杂填土)外,大面积丘间谷地自上而下第四系由黏土和砂砾石构成,其下为震旦系长岭子组(Zc)泥质板岩、钙质板岩及粉砂质板岩;丘陵区为震旦系桥头组(Zq)中厚层石英岩夹薄层板岩。

本区地下水类型为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水。含水层为亚砂土、亚黏土夹碎石透镜体、砂砾石以及全-强风化板岩、辉绿岩孔隙裂隙含水综合体,富水性较弱,单井涌水量小于 200 t/d,地下水水位埋深在 2~ 30 m 之间,主要含水岩组为震旦系砂岩、石英岩、千枚岩、板岩,地下水类型为潜水及上层滞水。地下水主要接受大气降雨补给,土(岩)体渗透性能弱,地下径流滞缓。地下水的补、径、排特征与地形地貌吻合,补给区在丘陵,补给来源主要为大气降水和侧向径流补给,径流区在山前平原,排泄区在沿海区域,排泄方式主要为向海排泄及蒸发。

2　研究方法

对研究区地下水水质进行现状评价,分析其受污染情况,并设定事故情景,模拟预测事故状态下污染物对区域地下水含水层及邻近海域的影响范围和程度。

2.1　地下水水质评价

选取 24 项指标对研究区地下水质量进行评价,评价标准采用《地下水质量标准》(GB/T 14848–93)中的Ó类标准,未包含的石油类污染物参照《地表水环境质量标准》(GB 3838– 2002)的Ñ类标准。评价方法采用单因子指数法和 F 值法相结合。

2.1.1　单因子指数法

计算公式为

$$S_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \tag{1}$$

式中: S_i 为第 i 种污染物的单因子水质指数; C_i 为第 i 种污染物在地下水中的浓度(mg/L); C_{0i} 为第 i 种污染物的评价标准(mg/L)。

2.1.2　F 值法

《地下水质量标准》(GB/T14848– 1993)将地下水质量划分为五类,首先根据不同的类别确定单项组分评价分值 F_i,再根据公式(2)(3)计算得出综合评价分值 F,根据表 2 划分地下水质量级别。

表 1　单项组分评价分值 F_i

Tab.1　Individual component evaluation score F_i

类别	Ñ	Ò	Ó	Ô	Õ
F_i	0	1	3	6	10

$$F = \sqrt{\frac{\overline{F}^2 + F_{max}^2}{2}} \tag{2}$$

$$\overline{F} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} F_i \tag{3}$$

式中: F_{max} 为 F_i 中的最大值; $\overline{F}$ 为 F_i 的平均值; n 为项数。

表 2　地下水质量级别划分

Tab.2　Groundwater quality classification

级别	优良	良好	较好	较差	极差
F	< 0.80	0.80~ 2.50	2.50~ 4.25	4.25~ 7.20	> 7.20

2.2　模拟条件及计算过程

2.2.1　计算范围

根据野外现场勘查分析,依据山脊线和海岸线形成的自然边界可将研究区划分为四个相对独立的水文地质单元。第一区处于研究区的东北部,其中

分布有居民区和部分工业企业, 最大风险源为石化炼油厂, 该区为最大的水文地质单元, 面积约 50.5 km^2, 海岸线较长; 第二区为集中的油罐区, 其西北与西南由基岩山区构成自然边界, 东南临海, 面积约 11.1 km^2; 第三区分布有危险废物填埋场和部分工业企业, 西南临海, 东北与北部为地下水的自然边界, 面积约 10.3 km^2; 第四区位于研究区的西北部, 无风险源存在。

由于居民区全部分布在第一区域内, 发生事故污染后饮用水将受影响, 对居民的健康构成威胁, 东部海域也将受到影响, 综合考虑以第一区域为例进行模型模拟, 见图 1。

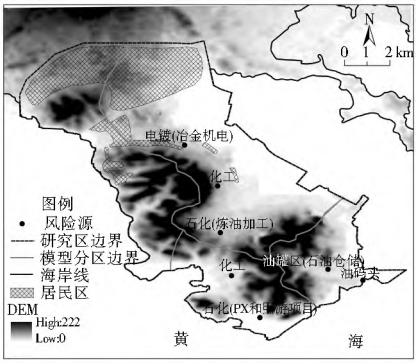


图 1 研究区敏感点及保护目标位置

Fig. 1 Locations of sensitive points and protection objectives

2.2.2 概念模型

由于污染物的泄露对潜水含水层会产生影响, 对潜水模拟计算。因此, 计算的目的层包括: 第一层, 第四系孔隙水含水层以及第四系下部的基岩浅层风化裂隙水含水层, 将二者概化为潜水含水层; 第二层, 基岩弱透水层, 概化为模型隔水层。北边界为自然地表分水岭, 为地下水补给边界; 西部和南部边界是由基岩山区构成的自然边界, 为地下水补给边界; 东部以海岸线作边界, 为地下水排泄边界。模拟区的上部边界为潜水面, 为水量交换边界, 接受大气降水入渗、潜水蒸发、河道渗漏和灌溉水回渗等; 下部边界为隔水层(弱透水层)底板, 概化为隔水边界。模拟区第四系孔隙潜水主要接受侧向径流补给, 其次为大气降水, 而其主要排泄方式为地下水蒸发和侧向排泄。

2.2.3 计算方法

为了评价泄漏事故状态下污染物对周围地下水环境和海域的污染风险, 利用地下水流模型和溶质运移模型, 定量预测地下水和海域污染情况。

根据上述的水文地质概念模型, 确定模拟区的数学模型为非均质、各向同性、三维稳定流模型, 用如下微分方程的定解问题(公式 4) 进行描述:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial x}\left(K_h \dfrac{\partial H}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial y}\left(K_h \dfrac{\partial H}{\partial y}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(K_h \dfrac{\partial H}{\partial z}\right) + \varepsilon = 0 \\ \qquad (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t)|_{t=0} = h_0 \qquad (x, y, z) \in \Omega \\ K_h\left(\dfrac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + K_h\left(\dfrac{\partial H}{\partial y}\right)^2 + K_v\left(\dfrac{\partial H}{\partial z}\right)^2 - \dfrac{\partial H}{\partial z}(K_v + p) + p = 0 \\ \qquad (x, y, z) \in \Gamma_0 \\ H(x, y, z)|_{\Gamma_1} = h_1 \qquad (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ K_n \dfrac{\partial H}{\partial \vec{n}}|_{\Gamma_1} = q \quad (x, y, z) \in \Gamma_2 \end{cases} \tag{4}$$

式中: H 为地下水位标高(m); K_h、K_v 为水平和垂直渗透系数(m/d); ε 为潜水含水层的垂向补排强度($m^3/d \cdot m^2$); h_0 为潜水含水层初始水位标高(m); h_1 为第一类(定水位)边界水位标高(m); p 为潜水面的蒸发和降水等(m/d); Γ_0 为渗流区域的上边界; Γ_1 为一类边界; Γ_2 为二类边界: n 为二类边界外法线方向; K_n 为边界面法向方向的渗透系数(m/d); q 为第二类边界上的单宽渗流量, 流入为正, 流出为负, 隔水边界为 0(m^2/d); x, y, z 为坐标变量(m); Ω 为渗流区域。

上述数学模型包括偏微分方程、初始条件和一类、二类边界条件, 共同组成定解问题, 可应用三维有限差分法, 将该数学模型离散为有限差分方程组, 采用 GMS 软件中的 MODFLOW 模块进行求解。

本次溶质运移模拟预测的数学模型为准三维地下水流场中的对流- 弥散方程和定解条件(公式5):

$$\begin{cases} \dfrac{\partial c}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(D_x \dfrac{\partial c}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial y}\left(D_y \dfrac{\partial c}{\partial y}\right) + \dfrac{\partial}{\partial z}\left(D_z \dfrac{\partial c}{\partial z}\right) - \\ \dfrac{\partial(u_x c)}{\partial x} - \dfrac{\partial(u_y c)}{\partial y} - \dfrac{\partial(u_z c)}{\partial z} + I \\ \qquad (x, y) \in \Omega, t > 0 \\ c(x, y, 0) = c_0(x, y) \quad (x, y) \in \Omega, t > 0 \\ c(x, y, t)\vec{u} \cdot \mathrm{grad}c) \cdot \vec{n}|_{B_1} = (c(x, y, t)\vec{u} - \\ D \cdot \mathrm{grad}c) \cdot \vec{n}|_{\Gamma_1} \quad (x, y) \in B_1, t > 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中: c 为饱和含水层中污染物的浓度(ML^{-3}); t 为时间(T); u_x、u_y 为孔隙平均实际流速(LT^{-1}); $u_x = v_x/n$, $u_y = v_y/n$, 其中 v_x、v_y 为渗流速度(LT^{-1}), n 为有效孔隙(无量纲); D_x、D_y、D_z 为坐标轴方向的主弥散系数(L^2T^{-1}), $D_x = \alpha_L \cdot u$, $D_y = \alpha_T \cdot u$, $D_z = \alpha_V \cdot u$ 其中 α_L、α_T、α_V 分别为纵向、横向弥散度、垂向弥散度(L); I 为单位时间单位面积含水层内由于源汇项流量 W(包括污染源、抽水和降水入渗)引起的污染物浓度 c_s 变化, $I = c_s W/n$; $c_0(x, y)$ 为初始时刻区域 Ω 上的溶质浓度分布; B_1 为给定溶质通量边界。

应用 GMS 软件中的 MT3DMS 模块计算污染物在地下水中迁移的范围和浓度值。

2.2.4　参数确定

野外抽水试验(4 个)、渗水试验(4 个)结果显示,模拟区渗透系数为 2~ 10 m/d。弥散系数采用定水头的淋滤试验获得,本模型给定 $\alpha_V/\alpha_L = 0.2$, $\alpha_H/\alpha_L = 0.2$。

2.2.5　事故情景设计

根据该半岛区域企业的特点,结合以往事故资料,以及考虑同时对居民区和海域的影响,选取模拟区内某石化企业的储运区和设置区等发生污染风险可能性较大、在事故工况下特征污染物渗漏量较大的场景进行模拟预测。设计情景如下:

假定某炼油厂原油发生油品泄漏后,油品漫流到无硬化的地表或流入到雨水沟,形成圆形、带状等污染带约 300 m^2。事故表面清理后,仍残留原油 1 500 kg,随着降雨入渗等油品进入地下水。

在污染物泄露区和周边设置 4 个污染物监测点: Ob1 位于泄露点以北约 300 m; Ob2 在泄露点西北方向约 680 m; Ob3 在东北方向 1 600 m; Ob4 在泄露点西北方向约 2 500 m,该点处于距泄露点最近的居民区。

3　结果分析

3.1　地下水水质现状分析

根据研究区的地下水径流方向,以及地下水保护目标和敏感点位置,在研究区地下水流向的上游、下游及周边布置了共 16 个地下水水质监测点见图 2,评价结果如下。

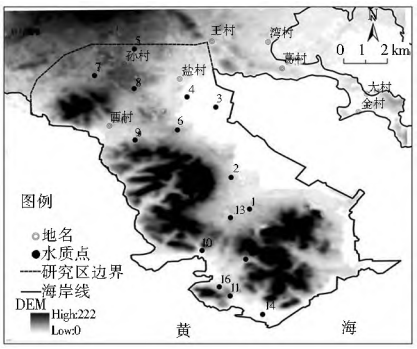


图 2　地下水水质采样点

Fig. 2　Locations of sampling points of groundwater quality

16 个监测点中,只有 5 号监测点水质为良好,3 号和 14 号监测点水质级别为极差,其他点均为较差,整体来看,该地区水质较差。3 号监测点有 5 项指标超过地下水 Ó 类水质标准,对水质影响较大的是氯化物、总大肠菌群,其次是溶解性总固体、硫酸盐。14 号监测点有 12 项指标超标,对该点水质影响较大的指标为 pH、总硬度、高锰酸钾盐指数、氨氮、氯化物、硫酸盐、总大肠菌群、铅、镉、镍、溶解性总固体,其次为铁。

24 项指标中,pH、总硬度、高锰酸盐指数、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、氯化物、硫酸盐、总大肠菌群、石油类、铅、镉、铁、镍、锰、溶解性总固体的监测数据超过地下水 Ó 类水质标准。其中,pH、铅、镉、铁、镍只在一个监测点 14 号超标;所有监测点中总大肠菌群均超标,而且有 9 个监测点为 Õ 类,对水质影响较大,可能是由于生活污水、垃圾堆放及养殖牲畜的粪便所致。

石油类浓度超标的监测点有 2 号、6 号、12 号、13 号,超标率为 31%,可能由于周边的石化企业造成,其中 2 号、6 号、13 号均位于居民区附近;重金属超标的监测点有 13 号、14 号、15 号,其中 13 号和 15 号监测点锰超标,13 号监测点位于炼油厂,15 号点位于废弃物处置场,可能在废弃物堆放及处理过程中进入地下水,14 号点铅、镉、镍严重超标,铁轻微超标;溶解性总固体超标的点为 1 号、3 号、11 号、12 号、14 号;3 号、4 号监测点的高锰酸钾指数、氨氮、亚硝酸盐、硫酸盐轻微超标,可能由于居民养殖施肥和生活垃圾堆放造成。其中超标最严重的 14 号点有 12 个监测项超标,该点位于某石化企业内 1 号监测井,邻近该企业内部的污水处理厂。

由上述结果看出,研究区水质较差,污染物种类复杂,而且距离一些石化企业较近的居民区附近的监测点水质均受到石油类的污染。由于地下水将通过径流排泄向周边海域,地下水的污染也将使周围海域环境受到影响。

3.2　地下水流模型识别验证

为了确定所建立的水文地质数值模型是否能够基本正确反映实际水文地质条件,故对模型进行校对与检验。稳定流模型要符合以下条件: ¹ 水文地质参数要符合实际水文地质条件; º 模拟的地下水要基本均衡,即均衡期内均衡区地下水补给量与排泄量要基本相等; » 模拟得出的地下水流场要与初始给定的流场基本一致,即要求模拟等值线与实测等水位线在数值和形态上基本相似,模拟流场可以尽量真实客观反映地下水流动的趋势。

将模拟区作为一个源汇项水量达到均衡的水均衡区,该区水均衡的要素包括降水入渗、侧向流入、侧向流出、人工开采及潜水蒸发,利用均衡式进行均衡计算。

$$\Delta Q = Q_{补} - Q_{排} = (Q_{降水入渗} + Q_{侧向流入}) - (Q_{侧向流出} +$$

$Q_{开采}+Q_{蒸发})$ (6)

模拟期内模拟区地下水系统源汇项水量统计及均衡计算结果见表 3。理论上稳定流均衡计算结果 ΔQ 应为 0, 模型实际的均衡计算结果 ΔQ 为 $-34.91\ m^3/d$, 相对误差($\Delta Q/Q_{补}$) 为 0.16%(小于 10%), 则认为满足稳定流水量平衡条件。由图 3 可见, 模拟的地下水流场与实测地下水流场的拟合效果较好。

表 3 地下水量均衡计算表

Tab. 3 The calculation of groundwater balance

补给量 $Q_{补}$	水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)	排泄量 $Q_{排}$	水量/($m^3 \cdot d^{-1}$)
降雨入渗量	3850.14	蒸发排泄量	-11209.05
侧向流入量	18317.20	侧向流出量	-10993.21
总量	22167.34	总量	-22202.25
$\Delta Q=-34.91$ $\Delta Q/Q_{补}=-0.16\%$			

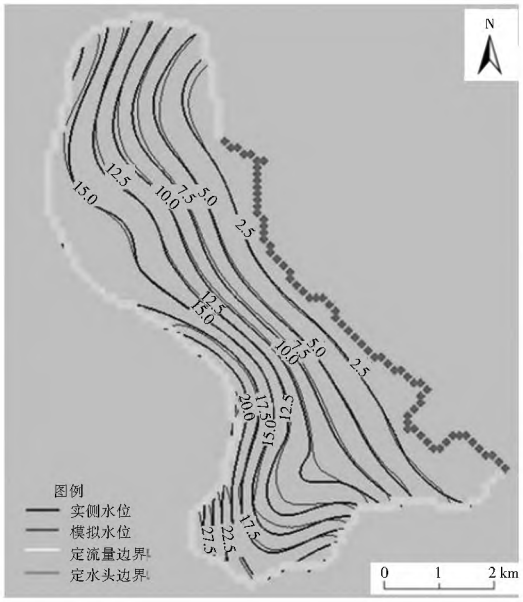


图 3 模拟区地下水流场拟合

Fig. 3 The fitting of groundwater flow field

3.3 事故情景预测结果

本模拟的模拟时段自泄漏时间点起, 以每 120 d 为一时段, 模型运行 150 个时段(共约 50 年), 通过预测泄漏事故发生后, 不同情景下给定源强的污染物在地下水含水层中的浓度时空分布, 确定污染事故对本区地下水环境和海域的影响范围和程度。污染源和监测点位置见图 4。

按照情景设计, 给定原油、汽油泄漏量共 1 500 kg, 根据污染物运移模拟结果, 给出了污染物在不同时段(120 d、360 d、18 00 d、3 600 d、7 200 d、10 800 d) 的污染物浓度和迁移范围, 见图 5。在泄露点附近设置了污染物监测井, 各监测点污染物浓度随时间变化曲线见图 6。

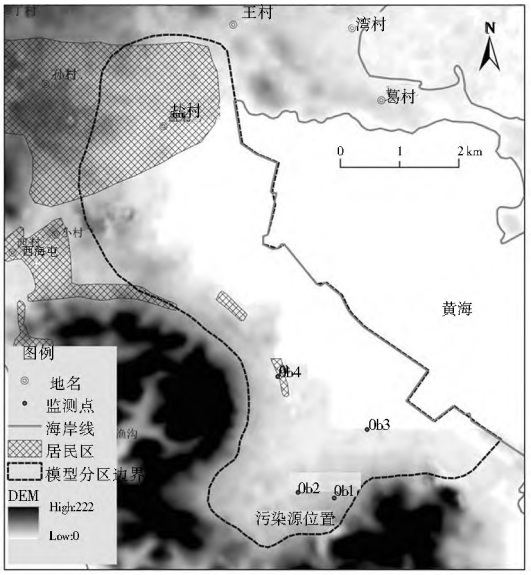


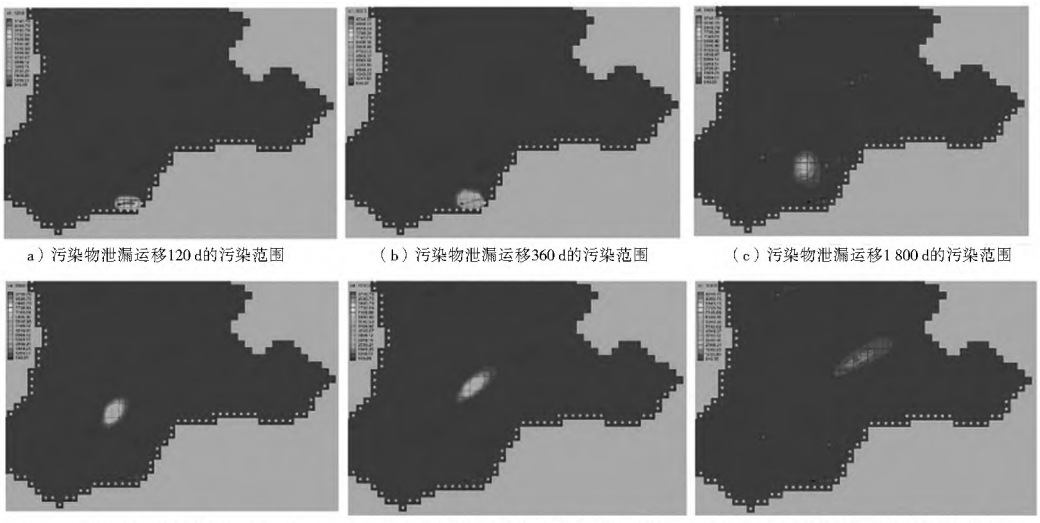
图 4 污染源、监测点位置

Fig. 4 Locations of pollution sources and monitoring sites

由图 5 可知, 污染晕在 1 年内主要向四周扩散, 之后由西南向东北迁移, 与地下水流方向基本一致。随着时间增长, 污染晕在水流方向上逐渐向海岸迁移, 面积不断变大, 在 30 年后污染面积达到最大, 约 0.26 km^2; 运移 35 年后开始对海洋环境产生影响; 45 年后污染物全部迁移入海。

从各个监测点污染物浓度随时间变化的结果(图 6) 来看, 监测井 Ob2 因为不在污染物运移的途径内, 未观测到污染物; 监测井 Ob1 在 1 000 d 时开始观测到污染物, 随后浓度开始增大, 在约 2 000 d 污染物浓度达到最大 280 mg/ L, 7 000 d 后污染物几乎全部移出; 监测井 Ob3 在 6 000 d 时开始出现污染物, 在 10 250 d 达到最大 1 500 mg/ L, 15 000 d 污染物移出监测范围; Ob4 位于居民区附近, 3 500 d 开始对监测点水质产生影响, 在 5 000 d 左右污染物浓度达到最大 0.55 mg/ L, 在 4 500~ 5 500 d 之内其浓度超过了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 中石油类浓度限值 0.3 mg/ L。

综上, 污染事故发生后, 所产生污染物对地下水含水层的污染范围较大, 时间较长, 造成的污染严重。由于污染物下渗后, 会经由地下水介质对周围海域产生影响, 因此做好地下水防渗措施至关重要。建议在厂区四周成槽灌注固化灰浆形成截渗墙, 将泄露的污染物控制在一定的区域范围内, 避免厂区外界的地下水环境受破坏, 还可以在厂区下方铺设渗透系数很小的物质, 如黏土和土工膜等来减小污染物渗入速度[9]。若地下水已受到污染, 则应采取人工补给、加大抽水排除污水、污染灌溉及微生物修复等措施来进行修复[10-11]。当石油类污染物进入海

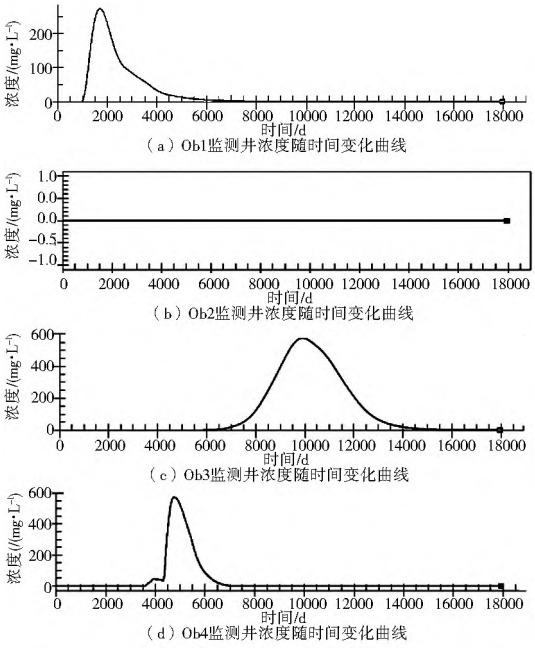


a）污染物泄漏运移120 d的污染范围　（b）污染物泄漏运移360 d的污染范围　（c）污染物泄漏运移1 800 d的污染范围

（d）污染物泄漏运移3 600 d的污染范围　（e）污染物泄漏运移7 200 d的污染范围　（f）污染物泄漏运移10 800 d的污染范围

图 5　原油泄漏事故状态下污染物在地下水中的运移模拟结果

Fig. 5　The migration simulation results of pollutants in the groundwater under oil spill accident situation



（a）Ob1监测井浓度随时间变化曲线

（b）Ob2监测井浓度随时间变化曲线

（c）Ob3监测井浓度随时间变化曲线

（d）Ob4监测井浓度随时间变化曲线

图 6　监测井污染物浓度随时间变化曲线

Fig. 6　Changing curve of pollutants concentration of montoring wells with time

洋后，一般应采取物理处理法、化学处理法及自然降解、生物处理法和燃烧法等三类处理方法[13]。除此之外，为减少突发性事故危害，化工园区周围社会和园区内各个存在环境风险的企业均需建立相关的风险防范措施及应急预案[14-20]。

4　结论

通过对研究区水质现状分析及污染事故模拟预测，可得出以下结论：(1) 某半岛地下水水质状况较差，污染物种类较多，居民区的饮用水水质受石油类污染物的影响很大；(2) 模拟区的石化炼油厂原油、汽油发生油品泄漏后，污染物通过地下水介质向东北方向排泄进入海水，对北部的居民区地下水质量产生严重影响；(3) 从模拟结果来看，污染故事发生前期，进入地下水中的类污染物浓度迅速增加，随着浓度的不断累积，后期浓度增加缓慢。所以，为防止污染物在污染前期短时间内对周围地下水造成更大范围的污染，甚至对邻近海域造成影响，应及时发现污染源并立即采取措施进行处理。研究结果可为地区水资源管理及水环境保护提供依据，并为工业开发和发展规划的实施提供理论参考。

参考文献(References)：

[1]　边归国. 浅谈我国石化行业环境风险防范[J]. 能源与环境, 2013(5): 75-77. (BIAN Gui-guo. A discussion of environmental risk prevention in the petrochemical industry of China[J]. Energy and Environment, 2013(5): 75-77. (in Chinese))

[2]　王晓伟, 李纯厚, 沈南南. 石油污染对海洋生物的影响[J]. 南方水产, 2006, 2(2): 76-80. (WANG Xiao-wei, LI Chun-hou, SHEN Nan-nan. Effect of oil pollution on marine organism[J]. South China Fisheries Science, 2006, 2(2): 76-80. (in Chinese))

[3]　郭志平. 我国近海面临的石油污染及其防治[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2004, 23(3): 269-272. (GUO Zhi-ping. The prevention and control of oil pollution off Chinese coastal water[J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science, 2004, 23(3): 269-272. (in Chinese))

[4]　陈尧. 中国近海石油污染现状及防治[J]. 工业安全与环保, 2003, 29(11): 20-24. (CHEN Yao. The state of oil pollution of Chinese coastal water and prevention[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2003, 29(11): 20-24. (in Chinese))

[5]　陈家军, 王红旗, 奚成刚, 等. 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. (CHEN Jia-jun, WANG Hong-qi, XI Cheng-gang, et al. Environmental impact of oil pollutant on groundwater during oil field exploitation in Daqing-A modelling analysis[J]. Chinese Journal of

Applied Ecology, 2001, 12(1): 113-116. (in Chinese))

[6] 王莉, 张宝军, 瞿群, 等. 事故状态下输油管线对地下水污染的模拟分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(1): 29-32. (WANG Li, ZHANG Bao-jun, QU Qun, et al. Modeling on groundwater contamination by oil from pipeline seepage and breakage[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(1): 29-32. (in Chinese))

[7] 陈友媛, 郑西来, 佘宗莲, 等. 大庆油田轻质油泄漏对地下水系统污染研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 421. (CHEN You-yuan, ZHENG Xi-lai, SHE Zong-lian, et al. An analysis of the groundwater system contamination caused by the Daqing oil field's light oil spill[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 421. (in Chinese))

[8] 刘荣芳, 陈鸿汉, 王延亮, 等. 浅析某油田地下水石油类污染途径[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 153-159. (LIU Rong-fang, CHEN Hong-han, WANG Yan-liang. Ways of groundwater pollution by oil in an oilfield[J]. Geology in China, 2007, 34(1): 153-159. (in Chinese))

[9] 左锐, 王金生, 滕彦国. 滨海区石化建设项目的地下水环境保护措施模拟研究[J]. 北京师范大学学报, 2009, 45(5/6): 647-653. (ZUO Rui, WANG Jin-sheng, TENG Yan-guo. Modeling of groundwater protection schemes in a coastal zone: impact of a petrochemical project[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(5/6): 647-653. (in Chinese))

[10] 殷素娟, 张亚敏, 邵忠瑞, 等. 周口市地下水污染综合防治浅析[J]. 地下水, 2008, 30(4): 50-126. (YIN Su-jun, ZHANG Ya-min, SHAO Zhong-rui, et al. Analysis of comprehensive preservation and control of Zhoukou's ground water contamination[J]. Groundwater, 2008, 30(4): 50-126. (in Chinese))

[11] 陈立, 张发旺, 张琳, 等. 土著微生物修复石油污染地下水的研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(6): 56-77. (CHEN Li, ZHANG Fa-wang, ZHANG Li, et al. Experimental study on indigenous microbial remediation of oil-contaminated groundwater[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(6): 56-77. (in Chinese))

[12] 方曦, 杨文. 海洋石油污染研究现状及防治[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(9): 78-80. (FANG Xi, YANG Wen. The current status of petroleum pollution of the ocean and the prevention[J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(9): 78-80. (in Chinese))

[13] 张丽萍, 王辉. 不同海面状况海洋石油污染处理方法优化配置[J]. 海洋技术, 2006, 25(3): 1-6. (ZHANG Li-ping, WANG Hui. Optimization design of countermeasures to clean up the marine oil pollution in different sea surface conditions[J]. Ocean Technology, 2006, 25(3): 1-6. (in Chinese))

[14] 曾明荣, 吴宗之, 魏利军, 等. 化工园区应急管理模式研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(2): 172-175. (ZENG Ming-rong, WU Zong-zhi, WEI Li-jun, et al. Study on emergency management model for accidents in chemical industry park[J]. China Academy of Safety Science & Technology, 2009, 19(2): 172-175. (in Chinese))

[15] 连伟, 邵茂清, 侯改娟. 天然气净化厂事故废水收集处理系统设计[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 171-174. (LIAN Wei, SHAO Mao-qing, HOU Gai-juan. System design for collection and disposal of accidental wastewater in a natural gas purification plant[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 171-174. (in Chinese))

[16] 赵汉青. 我国油气管道的事故成因及环境预防措施[J]. 油气储运, 2015(04): 1-6. (ZHAO Han-qing. The causes of oil and gas pipelines accidents and precautionary measures for environment conservation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015(04): 1-6. (in Chinese))

[17] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (XUE Yu-qun, XIE Chun-hong. Groundwater numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))

[18] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2011. (ZHANG Ren-quan, LIANG Xing, JIN Meng-gui, et al. Fundamentals of hydrogeology[M]. Beijing: Geology Publishing, 2011. (in Chinese))

[19] 郝治福, 康绍忠. 地下水系统数值模拟的研究现状和发展趋势[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(1): 77-81. (HAO Zhi-fu, KANG Shao-zhong. Current situation and development trend of numerical simulation of groundwater system[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(1): 77-81. (in Chinese))

[20] 孙从军, 韩振波, 赵振, 等. 地下水数值模拟的研究与应用进展[J]. 环境工程, 2013, 31(5): 9-17. (SUN Cong-jun, HAN Zhen-bo, ZHAO Zhen, et al. Advances in research and application of groundwater numerical simulation[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(5): 9-17. (in Chinese))

(上接第 23 页)

[16] 李军, 游松财, 黄敬峰. 中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 109-114 (LI Jun, YOU Song-cai, HUANG Jing-feng. Spatial interpolation method and spatial distribution characteristics of monthly mean temperature in China during 1961-2000[J]. 2006, 15(1): 109-114. (in Chinese))

[17] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. (REN Guo-yu, GUO Jun, XU Ming-zhi, et al. Climate changes of china's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942-956. (in Chinese))

[18] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236. (WANG Zun-ya, DING Yi-hui, HE Jin-hai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(2): 228-236. (in Chinese))

[19] 符淙斌, 王强气. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493. (FU Cong-bin, WANG Qiang-qi. The definition and detection of the abrupt climatic change[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1992, 16(4): 482-493. (in Chinese))

[20] 李蔼恂, 肖辉, 周筠珺, 等. 河南省春季和秋季降水时空变化的特征研究[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 884-896. (LI Ai-xun, XIAO Hui, ZHOU Jun-jun, et al. Characteristics of spatio-temporal distribution of spring and autumn precipitation in Henan Province[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(6): 884-896. (in Chinese))