

石油类污染物在潜水含水层中的运移

高茂生^{1,2}, 刘 森^{1,2,3*}, 刘红军³

(1 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071;

2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071; 3 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100)

摘 要:结合新疆某电厂工程, 基于研究区环境水文地质条件, 建立数学模型, 分析电厂生产过程中石油类渗漏可能对地下水污染的影响, 对污染物在潜水含水层运移和变化进行了数值分析。结果显示, 石油类污染物运移方向与地下水流方向基本一致, 因弥散作用导致污染羽面积不断扩大。污染物浓度迁移曲线呈正态分布, 在污染源下游 400 m 处, 污染物运移 9 年时浓度达最大值 0.16 mg/L。预测 20 年后石油类污染物渗漏对潜水含水层的影响范围扩大到 36 400 m², 最大运移距离为 1 297 m, 其污染物运移已超过地下水平均水流所波及的范围。

关键词:石油类污染物; 地下水模拟; 潜水含水层; 运移

中图分类号: TE991.2

文献标识码: A

进入 21 世纪以来, 随着我国对西部地区开发力度加大, 人类工程活动对环境影响愈加明显, 地下水环境污染状况加重。地下水环境污染源主要为自然污染源、农林污染源、城市污染源、矿山与工业污染源、水管理失误和其他污染源(包括交通污染和自然灾害等)^[1]。地下水环境具有隐蔽性与难以修复等特点^[2], 所以地下水一旦受到污染, 其水质将在很长一段时间内得不到复原。目前, 我国地下水污染呈现由点到面、由浅到深、由城市到农村的扩展趋势^[3], 污染程度日益严重, 给人类身体健康与经济生活造成严重危害。

以新疆某电厂工程为例, 根据研究区环境水文地质条件, 结合污染源和污染途径的分析, 得出其柴油储罐突发性泄漏所产生的石油类污染

为主要的潜在污染源, 结合模型来模拟其污染物在潜水含水层中的运移。

1 研究区概况

研究区地势北高南低, 在地貌上分为山前隆起岗地和山前冲洪积砾质倾斜平原, 面积约 59 km²(图 1)。根据地质钻探、南部采砂厂的物探资料, 结合区域地层岩性, 可将研究区地层岩性划分为: 下更新统(Q₁^{pl})黏土、粉砂质黏土和含黏土砂砾石, 中更新统(Q₂^{pl})半胶结含黏土砂砾石、粉砂、砂质黏土, 上更新统洪积层(Q₃^{pl})砂砾石和全新统冲积层(Q₄^{al})砂砾石。研究区地表出露地层主要为上更新统洪积层(Q₃^{pl})砂砾石和全新统冲积层(Q₄^{al})砂砾石, 在北部亚肯背斜的轴部台地、斜坡与部分冲沟边坡上分布有中更新统(Q₂^{pl})半胶结含黏土砂砾石层。

根据当地气象站资料, 研究区多年平均气温为 10.6 ℃, 每年 1 月份气温最低, 平均气温 -8.5 ℃, 7 月份气温最高, 平均气温 24.9 ℃, 平均昼夜温差 14.7 ℃; 年平均降水量为 64.5 mm, 且分配

收稿日期: 2012-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072216); 国土资源大调查项目(GZH201200505)

作者简介: 高茂生(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海岸带环境地质及地下水方面的研究工作。E-mail: gms532@163.com

通讯作者: 刘 森(1989—), 男, 在读硕士, 环境工程专业。
E-mail: luicent@sina.com

不均,降水主要集中在夏季,尤其是 6—8 月的降水量约占年降水量 70%;年平均蒸发量 2 072 mm,是年降水量的 34 倍。

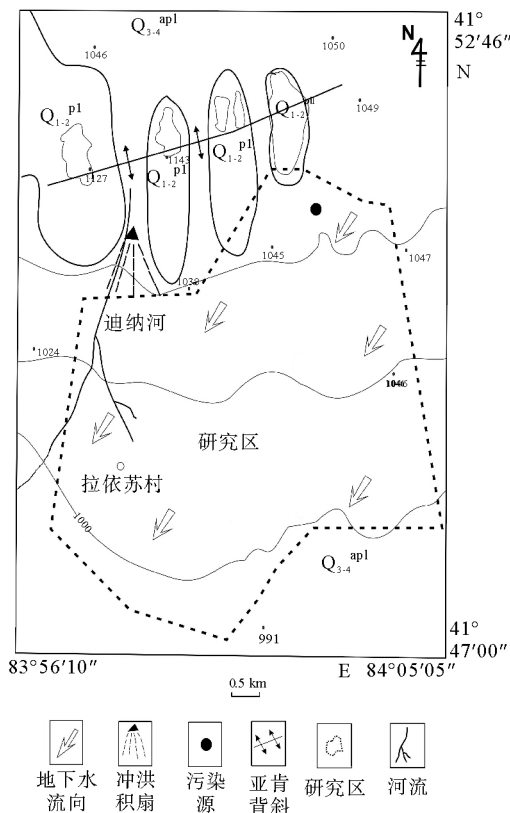


图 1 研究区概况

Fig. 1 Location map of studying area

2 研究区环境水文地质条件

研究区地下水类型为第四系松散沉积物孔隙潜水。含水层组主要为多层结构的潜水—承压含水层组。含水层岩性为上更新统洪积层(Q_3^{pl})砂砾石和全新统冲积层(Q_4^{al})砂砾石夹粗砂透镜体,多以粗砂充填。

上部潜水含水层岩性多为单一的、连续的砂砾石,有效含水层厚度 5~15 m,含水层由北向南逐渐变薄,含水层颗粒由上到下逐渐变细。潜水水位埋深由北向南逐渐变浅,水力坡度为 1.8‰。单井涌水量为 400.43 m³/d。地下水主要接受集中性暴雨、融雪洪水补给,以及北部潜水含水层的侧向径流补给和少量的地表水系、渠道和农田的

入渗补给。地下水排泄主要以径流排泄为主,其次为蒸发和人工混合开采。

隔水层岩性为粉砂质黏土,隔水顶板埋深在 28.5~46 m,厚度 8~10 m,为稳定连续隔水层。

下部承压含水层岩性多为砾石夹粗砂透镜体,颜色呈青灰色,结构较松散,分选性好,颗粒级配一般,磨圆度较好,含水层由北向南逐渐变厚,且颗粒逐渐变细,由单一砾石渐变为含粗砂透镜体。承压水顶板埋深由深变浅,水力坡度为 7‰。单井涌水量为 1 455 m³/d,富水性中等。主要接受北部承压含水层的径流补给,地下水流向为由北向南。地下水以径流排泄为主,其次为分散性开采。

3 地下水模型建立

3.1 概念模型

本次以北部为承压含水层、南部为潜水—承压含水层组相组合的地下含水层结构。其中,北部含水层结构:上部以半胶结含黏土砂砾石、黏土为承压含水层的隔水顶板,中部以中下更新统(Q_1^{pl} 、 Q_2^{pl})含黏土砂砾石为承压含水层,底部为新近系(N_2)砂质泥岩。南部含水层结构:上部以全新统冲积层(Q_4^{al})、上更新统洪积层(Q_3^{pl})砂砾层为潜水含水层;中部为分布稳定、连续的黏土、粉砂质黏土层,隔水顶板埋深 28.5~46 m,隔水层厚度 8~10 m;下部承压含水层岩性为砾石与粗砂的多层组合。

北部承压含水层与南部潜水—承压含水层组分界线大致在研究区的上边界以南 1 km。在垂向上二者通过不整合面处的中下更新统(Q_1^{pl} 、 Q_2^{pl})含黏土砂砾石与上更新统洪积层(Q_3^{pl})砂砾层相连。受冲沟影响,北部承压含水层的浅部被切割成不连续的块体,南部潜水层直接接受暴雨、融雪、洪水的集中补给和北部水量贫乏的潜水—承压水含水层组的径流补给。地下水呈层流,由北向南径流。

根据对地下水系统的内部结构、外部环境、边界条件、水文地质参数等综合分析,可概化为:非均质各向同性、三层结构的拟三维稳定的地下水

流系统(图 2)。

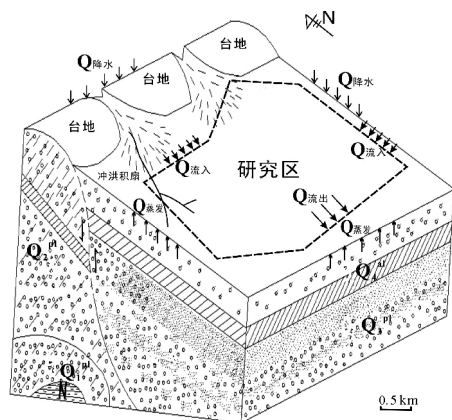


图 2 概念模型

Fig. 2 A conceptual model for simulation

3.2 边界条件

(1)侧向边界 模型西边界平行地下水流向,基本上无水量交换,可作为零流量边界;东、北边界为地下水流入边界,可作为流量边界;南边界为流出边界。

(2)垂向边界 模型的上边界为潜水含水层的自由水面,整个含水层系统通过这个边界可接受的大气降水入渗补给,灌溉入渗补给和泉水的泄流量很小。

在研究区的潜水含水层和承压含水层中间夹有一个弱透水层,两含水层之间水量交换微弱。

3.3 地下水流数值模型

对于非均质、各向同性、稳定地下水流系统,可用如下微分方程的定解问题来描述^[4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z \frac{\partial h}{\partial z}) + \epsilon = 0 & x, y, z \in \Omega \\ K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2 + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z}(K + p) + p = 0 & x, y, z \in \Gamma_0 \\ h(x, y, z) = h_0 & x, y, z \in \Omega \\ H(x, y, z)|_{\Gamma_1} = \varphi(x, y, z) & x, y, z \in \Gamma_1 \\ K_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, z) & x, y, z \in \Gamma_2 \end{cases}$$

式中: Ω 为渗流区域;

h 为含水体的水位标高,m;

K_x, K_y, K_z 分别为 x, y, z 方向上的渗透系数,m/d;

K_n 为边界面法向方向的渗透系数,m/d;

ϵ 为源汇项,1/d;

p 为潜水面的蒸发和降水等,m/d;

h_0 为含水层的初始水位分布,m;

Γ_0 为渗流区域的上边界,即地下水的自由表面;

Γ_1 为含水体的一类边界;

Γ_2 为渗流区域的侧向边界;

$\bar{n}$ 为边界面的法线方向;

$\Phi(x, y, z)$ 为一类边界水头,m;

$H(x, y, z)$ 为含水体的水头,m;

$q(x, y, z)$ 为二类边界的单宽流量,($m^3/d/m$),流入为正,流出为负,隔水边界为零。

地下水流场拟合情况见图 3。

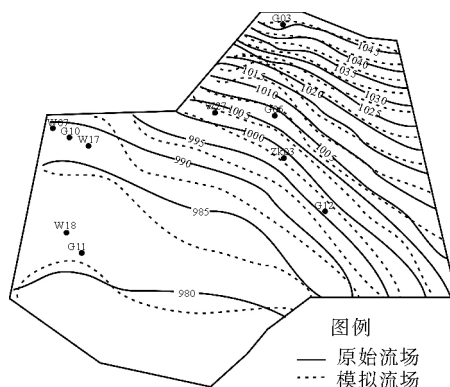


图 3 潜水地下水拟合流场

Fig. 3 Fitting flow field of phreatic groundwater

4 污染物运移模拟

4.1 特征污染物源强的确定

本次模拟预测的特征污染物主要为石油类,石油类是一种含有多种烃类的复杂有机混合物,地下水中石油类污染具有隐性、去除困难、污染场地条件差异性的特点,决定了其在自然状况下难于降解^[5]。石油类污染物不仅对水体、土壤生态、渔业、水生植物与动物有危害,而且对人体健康也具有严重的危害,经常受到石油类污染的儿童患急性白血病的风险要高出平均水平 4 倍,患急性非淋巴细胞白血病的几率是普通儿童的 7 倍。受石油类污染物污染的附近区域,儿童皮肤抵抗力明显减弱、白细胞下降、贫血率上升、肺功能受到影响^[6]。

石油类污染物检出下限及其水质标准限值见表 1。

表 1 石油类污染物检出下限及其水质标准限值
Table 1 The standard of water quality and lower limit of petroleum contaminants

模拟预测 因子	检出下限值 /(mg/L)	标准限值 /(mg/L)
轻柴油(石油类)	0.01	0.05

污染源强的确定主要是在由于柴油储罐发生突发性泄露,引起地下防渗层的破损,导致污染物进入地下水系统,造成地下水环境的污染。假定对柴油储罐($2 \times 200 \text{ m}^3$)发生爆炸时,伴生二次污染事故——物料泄漏,其中 90% 物料燃烧,则地面的柴油量为 3.32 t。据统计,此类事故泄露出来的柴油一般有 1%~10% 渗入地下水系统,假定事故后地面物料收集时间按 24 h 计,爆炸破坏的罐底围堰面积的 5%,柴油通过被破坏的位置进入到潜水含水层。考虑轻柴油的黏度系数,假设该位置处 10% 的柴油进入到潜水含水层,渗漏量为 16.6 kg/d,渗漏时长为 7 d。计算公式如下:

$$3.32 \text{ t/d} \times 5\% \times 10\% \times 1\,000 \text{ kg/t} = 16.6 \text{ kg/d}$$

4.2 污染物运移模拟

本次模拟采用美国环境保护局(USA EPA)开发的 GMS6.0 软件。GMS 软件是基于有限差分原理,其中污染物运移模拟主要是利用其 3D Grid 模块中的 MT3DMS 软件包,MT3DMS 为 MT3D 的修改版,是目前广泛应用的溶质运移模拟软件^[7]。MT3DMS 能够模拟地下水系统中的平流、扩散、衰减、溶质化学反应、线性与非线性吸附作用等现象^[8]。

地下水中溶质运移的数学模型可表示为^[9]:

$$n_e \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (n D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (n C V_i) \pm C' W$$

$$D_{ij} = \alpha_{ijmn} \frac{V_m V_n}{|V|}$$

式中: α_{ijmn} 为含水层的弥散度;

V_m 、 V_n 分别为 m 和 n 方向上的速度分量;

$|V|$ 为速度模;

C 为模拟污染物的浓度,mg/L;

n_e 为有效孔隙度;

C' 为模拟污染物的源汇浓度,mg/L;

W 为源汇单位面积上的通量;

V_i 为渗流速度,m/d;

由于地下潜水水动力弥散尺度效应的存在,难以通过野外或室内弥散试验获得模拟范围内各点的弥散度,本次弥散度测量主要参考前人研究成果^[10],根据图 4 计算得弥散度值 $\alpha_L = 16 \text{ m}$ 。弥散度在此结果基础上按照偏保守的评价原则,取纵向弥散度值为 20 m,横向弥散度值为 2 m。地下水最大流速按 0.15 m/d,则 20 年内地下水运移距离为 1 095 m。

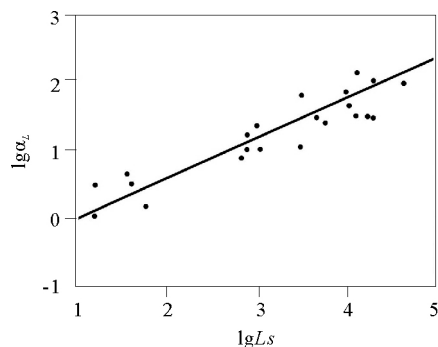


图 4 孔隙介质二维数值模型的 $\lg \alpha_L$ - $\lg L_s$ 图

Fig. 4 The $\lg \alpha_L$ - $\lg L_s$ diagram of 2D numerical model in porous medium

联合求解水流方程和溶质运移方程就可得污染物的空间分布。模拟结果见图 5—7。其中,超出检出下限值为蓝色表示,超出标准限值为红色表示。

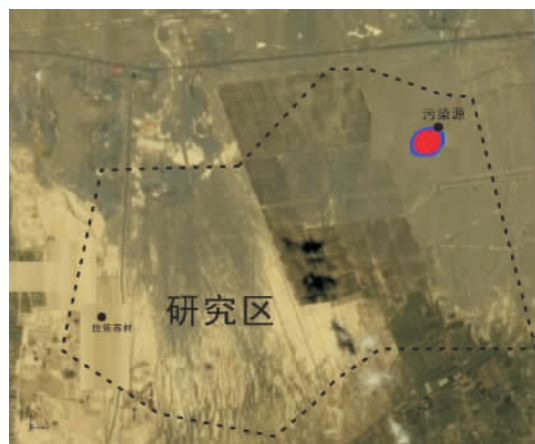


图 5 石油类渗漏 5 年后对潜水含水层的影响范围
Fig. 5 The influence of petroleum leakage incident on phreatic aquifer after 5 years

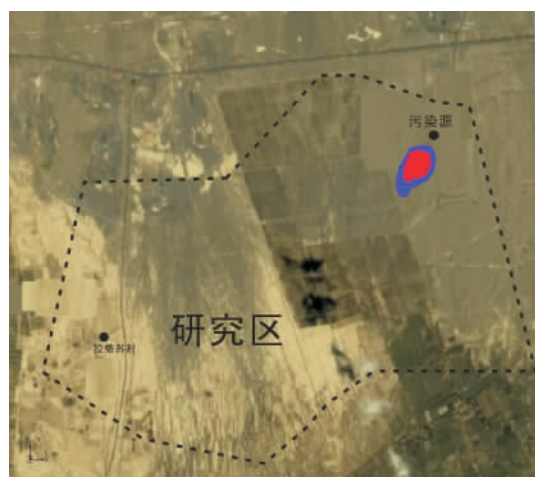


图 6 石油类渗漏 10 年后对潜水含水层的影响范围
Fig. 6 The influence of petroleum leakage incident on phreatic aquifer after 10 years

由表 2 可知,模型预测 20 年后,石油类污染物渗漏对潜水含水层的影响范围扩大到 36 400 m²,最大运移距离为 1 297 m,其污染物运移已超过地下水平均水流所波及范围。

分析显示,石油类污染物运移方向与地下水流基本一致,因弥散作用导致污染羽面积不断扩大。当污染物运移 1 260 d 后,并未检出其浓度,说明污染物并未对此处地下水造成影响;随着污

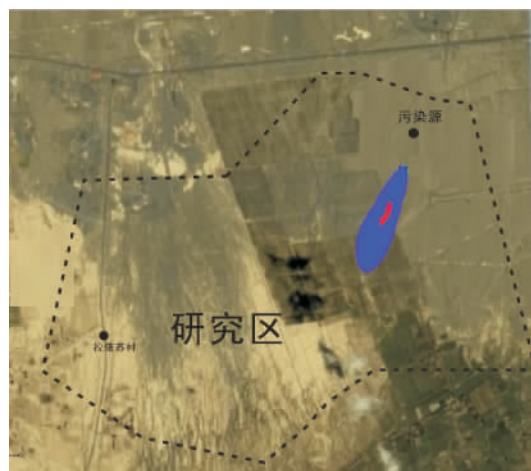


图 7 石油类渗漏 20 年后对潜水含水层的影响范围
Fig. 7 The influence of petroleum leakage incident on phreatic aquifer after 20 years

表 2 石油类污染渗漏对潜水含水层的影响范围

Table 2 The influence area of petroleum incident leakage on phreatic aquifer

模拟 年限/a	污染影响 范围/m ²	污染超标 范围/m ²	最大运移 距离/m
5	11 200	5 800	357
10	15 600	7 500	600
20	36 400	1 000	1 297

染物不断运移,其浓度呈现逐渐增加的趋势,在污染物运移 6 年后,其浓度超出标准限值,并在 9 年后在污染源下游 400 m 处浓度变化达到峰值 0.16 mg/L(图 8);此后,污染物浓度呈现逐渐降低趋势,在 17 年后时低于标准限值,污染情况得到一定程度缓解。

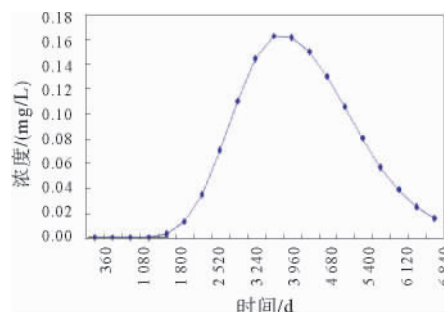


图 8 石油类污染物浓度在潜水含水层中的变化
Fig. 8 The change in petroleum concentration in phreatic aquifer

5 结论

(1)当柴油储罐突发性泄漏时,防渗层失去其作用,污染物进入地下水系统。模型计算显示,5年后污染影响范围为 0.112 km²,最大运移距离为 0.357 km;10年后污染影响范围为 0.156 km²,最大运移距离为 0.6 km;20年后污染影响范围为 0.364 km²,最大运移距离为 1.297 km。

(2)污染物浓度迁移曲线呈正态分布,石油类污染物运移 6 年后,在 400 m 处污染浓度已超出标准限值;在 9 年后污染浓度达到峰值 0.16 mg/L;此后,污染物浓度逐渐降低;在 17 年后低于标准限值,污染情况得到一定程度缓解。

(3)通过结合当地环境水文地质条件,模拟和预测了污染物的运移状况,可为今后讨论类似工程案例中污染物在包气带和饱和带中的迁移过程提供方法与借鉴。

参考文献:

[1] 周仰效,李文鹏.地下水水质监测与评价[J].水文地质工程

地质,2008(1):1-11.

- [2] 裴桂红,刘建军,王锦山.地下水石油类污染的数学模型及计算方法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2004,20(2):240-243.
- [3] 罗兰.我国地下水污染现状与防治对策研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2008,8(2):72-75.
- [4] 陈崇希,唐仲华.地下水问题数值方法[M].北京:中国地质大学出版社,1990.
- [5] 张平,陈彦群,黄奇文,等.沈阳石蜡化工有限公司厂区地下水污染模拟预测[J].沈阳大学学报(自然科学版),2012,24(1):48-52.
- [6] 张学佳,纪巍,康志军,等.水环境中石油类污染物的危害及其处理技术[J].石化技术与应用,2009,27(2):181-186.
- [7] Zheng C, Wang P. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems: Documentation and User's Guide [R]. Alabama: University of Alabama, 1999.
- [8] 贺国平,张彤,赵月芬,等. GMS 数值建模方法研究综述[J].地下水,2007,29(3):32-38.
- [9] 薛禹群.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1997.
- [10] 李国敏.海岛海水入侵动态三维有限元模型研究及应用[D].武汉:中国地质大学,1994.

TRANSPORTATION OF PETROLEUM CONTAMINANTS IN PHREATIC GROUNDWATER

GAO Maosheng^{1,2}, LIU Sen^{1,2,3*}, LIU Hongjun³

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

3 Environmental Science and Engineering Academy, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Numerical method was adopted in this paper to simulate the migration of petroleum contaminants in the phreatic aquifer using the data from an electric factory of Xinjiang. Simulating results show that the main direction of migration of petroleum contaminants is same as the shallow groundwater. Diffusion, however, may cause the leakage of contaminants. The dispersion of petroleum concentration follows a normal distribution pattern. At the place 400 meters far from the pollution source, the concentration of contaminants may reach 0.16 mg/L within 9 years. The pollution speed gradually increased in the beginning and decreased at last, but the leakage of petroleum was increasing gradually. It is estimated that the influence of petroleum contaminants may expanded up to an area of 36 400 m² in about 20 years. The maximum migration distance may reach 1 297 m, which exceeds the groundwater migration distance.

Key words: petroleum contaminants; groundwater simulation; phreatic aquifer; transportation