

珊瑚岛礁地下油库泄漏迁移规律及其对淡水透镜体的影响

杨 钢, 郭秀军, 卢 洁, 蔡永瑞

Migration patterns of oil leakage from underground oil depots on coral islands and reefs, and its impact on freshwater lenses

YANG Gang, GUO Xiujun, LU Jie, and CAI Yongrui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究

A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands

马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 罗剑 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 1-7

水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table

潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154-163

地下水污染风险预警等级及阈值确定方法研究综述

Review on the determination methods for early warning grade and threshold of groundwater pollution risk

王嘉瑜, 蒲生彦, 胡, 李博文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 43-50

某氨氮污染地下水体抽出-处理系统优化模拟研究

Simulation and optimization of a pumping and treating system for the remediation of ammonia polluted groundwater

王平, 韩占涛, 张海领, 孔贝贝, 张鑫馨 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 34-43

甘肃北山区域地下水流数值模拟研究

Numerical simulation of regional groundwater flow in the Beishan area of Gansu

曹潇元, 侯德义, 胡立堂 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 9-16

塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因

Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater in the Tacheng Basin

吕晓立, 刘景涛, 周冰, 朱亮 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 42-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202311055

杨钢, 郭秀军, 卢洁, 等. 珊瑚岛礁地下油库泄漏迁移规律及其对淡水透镜体的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 225-237.

YANG Gang, GUO Xiujun, LU Jie, et al. Migration patterns of oil leakage from underground oil depots on coral islands and reefs, and its impact on freshwater lenses[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 225-237.

珊瑚岛礁地下油库泄漏迁移规律及其对淡水透镜体的影响

杨 钢¹, 郭秀军^{1,2}, 卢 洁², 蔡永瑞¹

(1. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南 三亚 572000;

2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 在陆地资源日益短缺的背景下, 海洋环境的巨大资源潜力使人类开发海洋的进程不断加快。作为经略海洋的远涉枢纽, 在岛礁建设地下储油设施将成为开展各项工程的能源基础, 然而伴随而来的潜在泄漏风险是不可忽视的, 岛礁发生石油泄漏不仅会污染淡水透镜体, 甚至会进一步扩散至海洋, 对岛礁和海洋生态环境造成极大危害。为探究地下油库泄漏后的污染物迁移规律及其对淡水透镜体的入侵机制, 首先通过室内模拟试验确定了污染物迁移特征与主要驱动力, 之后利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了相同尺度的数值模型, 进一步明确了不同降水强度和油品性质对污染物迁移影响的规律。结果表明: (1) 珊瑚岛礁水文地质条件下的石油污染物迁移主要受两种驱动力的影响, 一是重力势驱动的垂向迁移, 二是岛礁动态地下水流场驱动的向海排泄; (2) 岛礁降水补给强度越大, 地下水流场驱动污染物向海排泄作用越强, 淡水透镜体所受影响越小; (3) 重质非水相类油品污染物呈现出不同于轻质非水相类油品的迁移规律, 但其对淡水透镜体无显著影响。研究结果可为珊瑚岛礁开发进程中的油库选址、污染防治以及淡水资源保护提供理论基础与参考依据。

关键词: 珊瑚岛礁; 淡水透镜体; COMSOL Multiphysics; 室内模拟试验; 多相流; 地下水污染

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0225-13

Migration patterns of oil leakage from underground oil depots on coral islands and reefs, and its impact on freshwater lenses

YANG Gang¹, GUO Xiujun^{1,2}, LU Jie², CAI Yongrui¹

(1. Sanya Institute of Ocean Research, Ocean University of China, Sanya, Hainan 572000, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Amid the increasing scarcity of terrestrial resources, the vast resource potential of the marine environment has accelerated human exploration and exploitation of the ocean. As a crucial pivot for maritime activities, the construction of underground oil storage facilities on islands and reefs can serve as an energy foundation for various projects. However, the potential risk of oil leaks cannot be overlooked, as oil spills on islands and reefs can contaminate freshwater lenses and even spread further into the ocean, causing significant harm to the ecological environment. To investigate the pollution migration patterns of underground oil storage leaks and their invasion mechanisms into freshwater lenses, This study determined the pollution migration

收稿日期: 2023-11-29; 修订日期: 2024-02-13

投稿网址: www.swdgcgz.com

第一作者: 杨钢(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事珊瑚岛礁淡水透镜体相关研究。E-mail: 1451124821@qq.com

通讯作者: 郭秀军(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事岛礁及海岸带地下水环境监测技术研究及装备开发。E-mail: guojunqd@ouc.edu.cn

characteristics and primary driving forces through indoor simulation experiments. A numerical model of the same scale was established using COMSOL to further clarify the influence of different rainfall intensities and oil properties on pollution migration. The results indicate that: (1) Oil pollution migration under the hydrogeological conditions of coral islands and reefs is primarily influenced by two driving forces that is vertical migration driven by gravity and seaward discharge driven by the dynamic groundwater flow field on islands and reefs. (2) The stronger the rainfall recharge intensity on islands and reefs, the greater the influence the groundwater flow field on driving pollution seaward, and the less impact on freshwater lenses. (3) DNAPL-type oil pollution exhibits different migration patterns from LNAPL-type oil pollution, but it has no significant impact on freshwater lenses. This study provides a theoretical basis and information for the selection of oil storage sites, pollution prevention, and freshwater resource protection during the development of coral islands and reefs.

Keywords: coral atolls; freshwater lens; COMSOL Multiphysics; indoor simulation experiment; multiphase flow; groundwater pollution

我国海域辽阔, 珊瑚岛礁众多, 是经略海洋的前进支点和开发海洋资源的关键枢纽^[1-2]。南海所有岛礁除西沙群岛的高尖石岛外皆为珊瑚岛礁, 据粗略统计其总面积约有 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[3]。随着向海图强, 建设海洋强国的发展战略不断强化^[4], 进一步开发海洋油气资源、建设利用珊瑚岛礁成为发展需要^[5]。目前我国海洋油气资源在开发上已呈现出“岸基—岛基”的双核开发空间结构^[6], 因此依托岛礁建设石油开采、加工、储存设施是满足岛上居民需要与保障各项工程建设能源需求的重要措施, 同时南海作为我国海上石油进口的必经之路, 建立岛礁油库对保障石油运输安全有着重要意义。

然而伴随着储油工程的建设, 随之而来的石油泄漏污染问题是不容忽视的。目前, 对于陆地环境地下地表与地下石油泄漏后污染物在地下水环境中的迁移转化规律国内外已有较多研究^[7-8]。对于饱和带中的非水相污染物迁移问题, 肖鹏等^[9]基于物理砂箱试验得到了重质非水相液体(dense nonaqueous-phase liquids, DNAPLs)在饱和介质中的污染规律; Sulaymon 等^[10]通过数值模拟研究了轻质非水相液体(light non-aqueous phase liquids, LNAPLs)在三维均质多孔介质中的迁移问题。然而岛礁地下油库泄漏后的污染物迁移受岛礁独特的地质条件与地下水流场显著影响, 将会呈现出不同于陆地环境的污染规律, 但尚未有学者对岛礁环境下的非水相污染物迁移问题开展研究。

此外, 石油污染物还会改变淡水透镜体的水质水量与分布形态, 甚至会进一步扩散至海洋, 对生态环境造成严重危害。淡水透镜体作为珊瑚岛礁上宝贵的淡水资源^[11], 具有重大的经济、生态和社会效益^[12], 但同时也十分脆弱, 容易受到各种自然因素与人类活

动的影响^[4], 从而导致水质变差, 可用淡水量减少。由于岛礁的地理位置特殊, 且研究上时间尺度较长, 近年来研究人员多采用数值模拟耦合水槽试验的方式^[13], 其结果的可靠性与准确度也得到了广泛验证。岛礁不整合面位置、地层非均质性以及海洋潮汐动力条件都被证明对岛礁地下水流场有显著影响继而影响淡水透镜体的动力学特性^[13-15]; 而岛礁工程建设如抽水井、防渗墙与地下构筑物等设施也会影响地下水流场并导致淡水形态与储量的变化^[16-19]。在岛礁人类活动日益频繁的情况下, 需要进一步探究岛礁工程建设产生的各种地下水污染物在这种动态流场影响下的迁移规律及其对淡水透镜体的入侵机制。

本文通过室内物理模拟试验搭建了珊瑚岛礁二维模型, 首次研究了岛礁地下油库发生极端石油泄漏后的污染物迁移规律, 同时基于数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 耦合溶质运移、变密度与多相流等地下水物理场, 构建了实验室尺度的淡水透镜体模型进行对比验证, 并深入探究不同降水入渗强度、不同油品种类的污染物迁移规律及其对淡水透镜体水质水量的影响情况, 得到了岛礁水文地质环境下的非水相液体(nonaqueous phase liquids, NAPLs)类污染物的迁移规律与两种主要驱动力, 最后对不同因素进行了深入分析与探讨, 为岛礁建设进程中的油库选址、地下水污染防治以及淡水资源保护提供了理论基础与参考依据。

1 研究方法

1.1 数学模型

1.1.1 概念模型

本研究基于我国南海珊瑚岛礁典型水文地质特

征(图1)^[3,20-21], 分别考虑了均质地层岛礁与二元地层岛礁横截面的二维轴对称概念模型(图2), 假设模型长度为 L , 高度为 H_0 , 顶部接受降水入渗, 补给率为 W , 模型两侧为海水边界, 均质地层岛礁渗透系数为 K , 二元地层岛礁全新世与更新世渗透系数分别为 K_1 、 K_2 。此外, 由于南海扩礁造岛工程完成后陆地面积仍然极为有限, 且已基本用于基础设施建设^[22-23], 因此岛礁储油库的修建应以位于地下且不影响淡水透镜体为前提, 因此本研究将石油泄漏处置于淡水透镜体发育

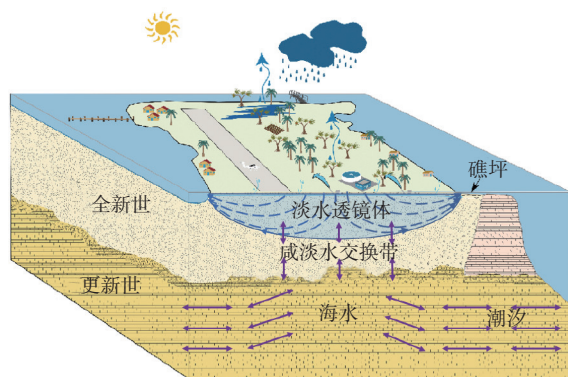


图1 岛礁水文地质特征图(据文献[20]修改)

Fig. 1 Hydrogeological characteristics of atolls (modified from Ref.[20])

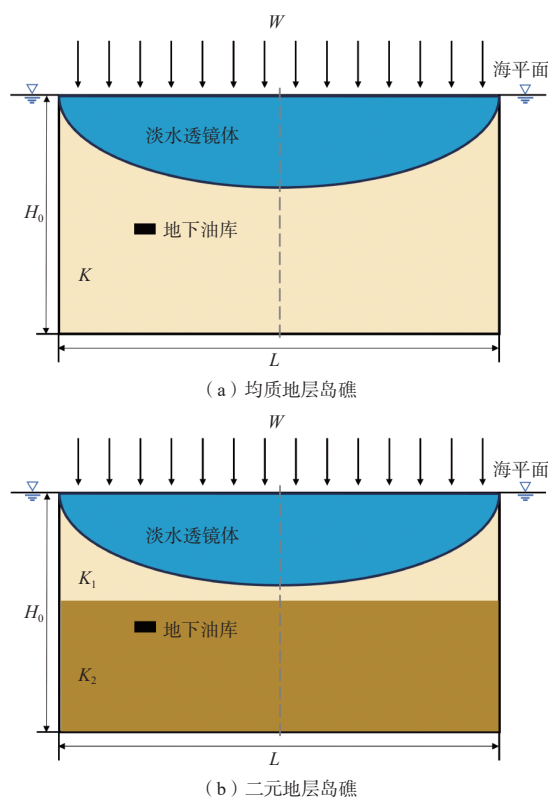


图2 岛礁概念模型示意图

Fig. 2 Conceptual models of atolls

下方, 研究污染物迁移规律以及淡水透镜体所受影响。

1.1.2 控制方程

淡水透镜体的维持得益于岛礁承接降水、向海排泄与咸淡水混溶三者的平衡之中, 其中岛礁地下水场符合达西定律, 海水与淡水的交换混溶作用符合溶质运移方程, 同时由盐度差异引起的咸淡水密度差使得淡水漂浮于咸水之上, 因此基于质量守恒和达西定律的变密度水流方程与溶质运移方程是保证形成淡水透镜体的关键, 该方程如下^[24]:

$$K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) + K \eta \frac{\partial c}{\partial z} = S_s \frac{\partial H}{\partial t} + \eta \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\rho}{\rho_0} q_s \quad (1)$$

式中: K ——渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

H ——测压管水头/m;

c ——混合流体盐浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

S_s ——贮水率;

t ——时间/d;

ρ_0 ——淡水密度(参考密度)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

q_s ——单位体积多孔介质的源或汇强度/d $^{-1}$;

η ——密度耦合系数/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

ρ ——混合流体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

其中, ρ 视为仅随溶质浓度变化的线性函数, 忽略温度、压力等其他因素对流体密度的影响, 表示为:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \left(1 + \varepsilon \frac{c}{c_s} \right) \\ \varepsilon &= \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \\ \eta &= \frac{\varepsilon}{c_s} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ_s ——海水密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

c_s ——海水密度对应的质量浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

ε ——密度差相对比率。

考虑对流-弥散作用的溶质运移方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \left(\frac{\partial c}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ii} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + \frac{(c^* - c)}{n} q_s \quad (3)$$

式中: u_i ——渗透流速/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

D_{ii} ——弥散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$);

c^* ——源或汇的流体浓度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

n ——多孔介质孔隙度。

本研究将石油污染物视为 NAPL 相, 饱和含水层中地下水两相流符合达西定律, 具体到水相和 NAPL 相分别满足以下关系式^[25]:

$$\begin{aligned} V_w &= -K_w(S_w)\nabla H_w \\ V_g &= -K_g(S_g)\nabla H_g \end{aligned} \quad (4)$$

式中: V_w 、 V_g ——水相、NAPL 相的渗透流速/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$);

K_w 、 K_g ——水相、NAPL 相的渗透系数/($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$);

S_w 、 S_g ——水相、NAPL 相的饱和度/%;

H_w 、 H_g ——水相、NAPL 相势能/m。

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置

本研究基于珊瑚岛礁地质与水动力条件开展了实验室物理模拟试验^[18]。物理模拟装置如图 3。水槽尺寸为 $60\text{ cm}\times 5\text{ cm}\times 28\text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 高)。水槽两侧为海水蓄水池,长度各为 6 cm ,用于模拟海水边界。水槽中间为砂箱,长度为 48 cm ,砂箱与海水池中间由多孔挡板与筛网隔开,保证咸淡水交换并防止砂体流出。水槽两端各有一根出水管,高度为 26 cm ,出水管的作用是排出被稀释海水以及维持海平面高度不变,从而形成稳定水头条件。水槽底板为不透水边界,正面与背面为透明玻璃以保证试验过程可视化。海水补充水箱通过海平面下方的两端进水口持续补充海水以保证两侧海水蓄水池盐度不变。降水装置由淡水水箱、可调节流量抽水泵^[26]与 2 根 PVC 管组成,PVC 管管长 48 cm ,内径为 4 mm ,并排置于砂箱上方并通过软管与水泵连接,以 5 mm 的间距于 PVC 管上均匀打孔以实现均匀降水条件,根据 Fetter 等^[27-29]开发的分析模型估算补给速率:

$$h^2 = \frac{W(l^2 - x^2)}{k(1 + \alpha)} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\rho_0}{\rho_s - \rho_0} \quad (6)$$

$$h^2 = \frac{W(\alpha + 1)l^2}{k} \quad (7)$$

式中: h ——单层含水层岛礁淡水透镜体的最大厚度/m,作为距离岛礁中心距离 x 的函数,本次计算 x 取 0 ^[29];

W ——补给率/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

l ——岛礁半宽度/m;

W ——补给率/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

k ——水力传导率/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

α ——Gerben-Herzberg 比值。

结合相关研究^[30],最终确定降水装置补给速率为 2.4 mm/min ,抽水泵总流量设置为 41 mL/min 。

1.2.2 材料与方法

室内试验分别模拟了均质地层岛礁结构与二元

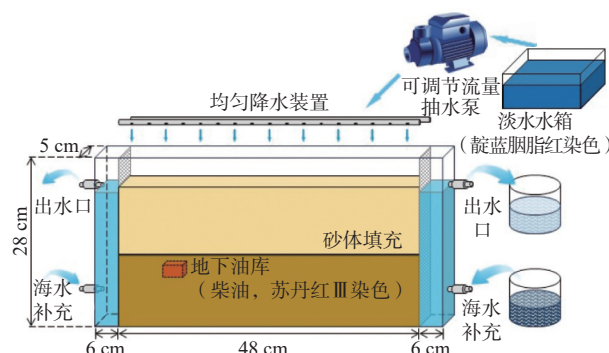


图 3 室内水槽试验装置

Fig. 3 Indoor water tank experimental setup

地层岛礁结构,基于永兴岛珊瑚砂颗粒级配曲线^[24],均质地层结构由粒径范围为 $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ 的细砂构成,二元地层结构由粒径范围为 $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ 的细砂与粒径范围为 $1.25\sim 2.00\text{ mm}$ 的粗砂构成^[31]。细砂与粗砂的渗透系数经实验室测定分别为 $3.3\times 10^{-3}\text{ cm/s}$ 和 $2.9\times 10^{-2}\text{ cm/s}$,其中细砂模拟珊瑚岛礁全新世,填充于砂箱 $12\sim 26\text{ cm}$ 高度,粗砂模拟珊瑚岛礁更新世,填充于砂箱 $0\sim 12\text{ cm}$ 高度,地层不整合面为水平方向。本试验中降水补给来源为自来水,模拟海水根据海水实际盐度由海水养殖盐配置而成,经实验室测量降水与模拟海水的密度分别为 $1\,000.1\text{ kg/m}^3$ 和 $1\,025.2\text{ kg/m}^3$ 。

结合岛礁实际情况,常规储油油品主要以航空用油与船用燃料油为主。根据相关标准^[32-33],油品主要参数见表 1。上述油品的密度与运动黏度与柴油相近,又因为柴油的挥发性比较低且黏度较高,在试验过程中对环境的污染较小^[34],因此室内水槽试验选取柴油作为污染物,通过注射装置与埋于砂体内部的硅胶细管(外径 1.5 mm)模拟地下油库泄漏。

表 1 3 种油品基本性质

Table 1 Basic properties of three types of oils

石油种类	动力黏度/($10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$)	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
3号喷漆燃料	1.11 ~ 7.20	886.5 ~ 900.0
船用燃料油	1.05 ~ 4.98	775.0 ~ 830.0
柴油	2.49 ~ 6.84	830.0 ~ 855.0

物理模拟试验通过染色法实现二维水槽内部动态过程可视化,其中降水补给淡水由靛蓝胭脂红染为深蓝色,石油污染由苏丹红 III 染为红色^[35],试验过程中根据颜色范围的变化获取淡水透镜体发育情况与石油污染物迁移规律。染色材料不会改变流体性质,试验结果通过相机进行拍照记录。

1.2.3 数值模拟

本研究使用的数值模拟软件为多物理场仿真软

件 COMSOL Multiphysics, 该软件以有限元法为基础, 通过求解偏微分方程(组)来实现真实物理现象的仿真^[36]。其中的多孔介质多相流模块与地下水流稀物质传递模块能够实现地下水变密度溶质运移与地下水多相流耦合^[37]。

通过数值模拟建立了三维水槽模型(图 4), 模型尺度为 48 cm×26 cm×5 cm, 上方设置为接受降水边界, 补给流量为 2.4 mm/min。模型底部与前后边界设置为无流动、无通量边界, 左右两侧设置为定水头、定浓度边界^[38], 用来模拟海水条件。模型中多孔介质孔隙度与渗透系数取值与水槽试验测得结果相同, 纵向弥散度为 0.05 cm, 横向弥散度为 0.005 cm^[21]。整个模型内部初始充满海水, 油库区域初始充满石油, 压力条件根据高程自动分配。根据室内试验实测值与相关文献资料^[21, 24] 得出模型参数设置见表 2。

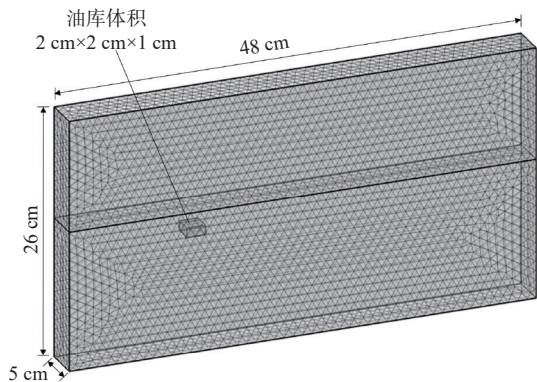


图 4 数值模拟网格模型
Fig. 4 Numerical simulation grid model

研究模型网格尺度根据选取物理场进行极细化剖分, 网格为自由四面体, 网格单元尺度范围为 0.01 ~ 1.00 cm, 最大单元增长率为 1.3, 曲率因子为 0.2。数值模拟划分为两步, 第一步为稳态研究, 不考虑污染条件, 使模型生成稳定的淡水透镜体。稳态求解器最大迭代次数为 100, 残差因子为 1 000。第二步为瞬态模拟, 研究石油污染在岛礁淡水透镜体发育稳定后的运移情况, 瞬态求解器容差因子为 0.1, 时间步进采用向后差分公式^[39]。总模拟时间 2.5×10⁴ s, 模拟时间步长为 5 s, 模拟结果每隔 5 s 输出一次。

1.3 模型验证

1.3.1 淡水透镜体稳态发育结果

为验证数值模拟结果的准确性, 将均质地层条件下水槽试验中淡水透镜体稳定后的图像与数值模拟第一步稳态研究结果对比验证。水槽砂箱中淡水透镜体形成情况如图 5(a)所示, 蓝色范围表示淡水透镜

表 2 数值模拟参数
Table 2 Parameters in the numerical simulation

参数	值
模型长度/cm	48
模型宽度/cm	26
模型深度/cm	5
网格尺寸/cm	0.01 ~ 1.00
网格数量	134 910
全新世深度/cm	0 ~ 12
更新世深度/cm	12 ~ 26
全新世水力传导率/(cm·s ⁻¹)	3.3×10 ⁻³
更新世水力传导率/(cm·s ⁻¹)	2.9×10 ⁻²
全新世孔隙度	0.3
更新世孔隙度	0.4
降水补给速率/(mm·min ⁻¹)	2.4
淡水密度/(kg·m ⁻³)	1 000
海水密度/(kg·m ⁻³)	1 025
海水盐浓度/(mol·m ⁻³)	1 000
石油密度/(kg·m ⁻³)	850
水相动力黏度/(10 ⁻³ Pa·s)	1.00
水相相对渗透率	S ₁ ²
油相动力黏度/(10 ⁻³ Pa·s)	5.00
油相相对渗透率	S ₂ ²
纵向弥散系数/cm	0.050
横向弥散系数/cm	0.005

注: 表中S₁为水相饱和度; S₂为油相饱和度。

体发育情况, 下边界通过蓝色曲线勾勒并通过实验室测得该处盐度为 264.8 mol/m³; 图 5(b)为水槽尺度模型稳态研究下淡水透镜体数值模拟结果, 两者对比可以看出: 室内水槽试验与数值模拟稳态结果所形成的淡水透镜体最大厚度基本相同, 前者于降水开始后 13 min 发育至稳定状态。但由于水槽试验的降水边界条件、海水边界条件以及砂土均质性存在细微误差以及水槽边壁效应的存在^[40], 使得其形成的淡水透镜体整体形状与数值模拟结果有所不同, 主要表现为透镜体两侧厚度相比于数值模拟结果偏大, 而数值模拟出的淡水范围为理想的透镜体形态。通过测量与计算, 得出室内水槽模拟试验稳定后的透镜体中心厚度约为 8.3 cm, 数值模拟结果透镜体中心厚度为 9.7 cm, 两者误差小于 15%, 表明该数值模型能够有效反映淡水透镜体的动力学特性^[41], 也证明了数值模拟相关设置的合理性。

1.3.2 石油污染物瞬态迁移结果

为探究岛礁水文地质条件下地下油库泄漏污染物迁移规律及其对淡水透镜体的影响, 分别对该情景进行了室内水槽试验与相同尺度的数值模拟, 并将两者结果进行对比验证(图 5)。研究结果表明: 在淡水

透镜体发育稳定的岛礁地下水动力条件下, 地下油库石油泄漏的污染物迁移规律主要表现为向上运移与向海排泄, 造成该污染物迁移方式的主要驱动力有两点: 一是 LNAPL 相的石油污染物与岛礁地下水的密度差异导致其在重力势作用下向上迁移; 二是岛礁承接降水入渗与海洋边界条件产生的高度动态地下水水流场驱动污染物迁移, 这种驱动力在污染从下到上迁移的过程中不断增强, 原因是更上方的淡水透镜体更为发育, 其位置所形成的地下水水流场作用更强。在这两种驱动力的作用下, 石油污染物表现出在向上迁移的过程中不断向近岸侧海水边界排泄的迁移规律。

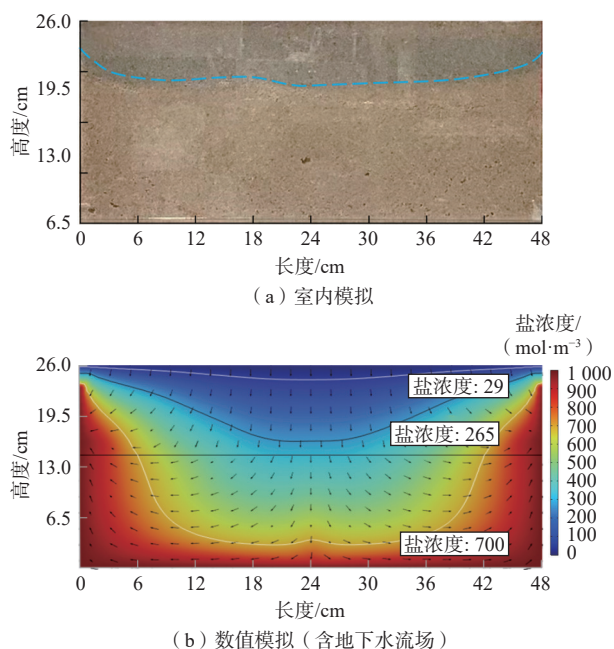


图 5 稳态发育结果

Fig. 5 Steady-state development

岛礁作为典型的二元地层结构, 更新世与全新世分层明显, 其交界处被称为不整合面, 两者之间的孔隙度、渗透系数等水文地质参数值差异较大, 其中渗透系数的差异可达 1~2 个数量级, 这是淡水透镜体维持的重要条件, 但同时也会对地下油库泄漏污染物迁移造成一定影响, 为探究这种影响规律, 本研究通过水槽试验与数值模拟分别建立了实验室尺度与原位尺度的岛礁二元地层模型, 结果表明: 地下石油污染物迁移至不整合面处会发生积聚效应, 这与前人的研究相对应^[42], 主要表现为污染物在不整合面处发生汇集, 继续向上迁移的趋势减缓, 同时在水平方向扩散, 这种扩散在地下水动态流场的作用下更趋向于近岸侧, 但也有相当一部分向右侧岛礁中心方向扩散。

随后污染继续在两种驱动力的作用下发生迁移, 但由于其已经在不整合面处向两侧均发生了水平扩散, 相比于均质地层岛礁石油污染物会更晚排泄至海水边界, 同时污染整体范围要大于均质地层岛礁。

通过对两类模型分别选取 4 个时间节点将室内水槽试验结果与数值模拟结果相互对比验证(图 6), 可以看出数值模拟结果与水槽试验结果对应良好, 都充分体现了在两种驱动力共同作用下的石油污染物迁移规律, 证明了多物理场耦合的水文地质模型与模拟方法的可行性与准确性。下面将利用该模型进一步探究两种驱动力的具体影响规律及不同情景下淡水透镜体形态与水质水量变化情况。

2 情景设置

2.1 不同降水入渗强度下污染过程模拟

降水补给作为岛礁淡水透镜体的唯一来源^[43], 在很大程度上决定了淡水透镜体的体积。此外降水在地表下渗并在咸淡水密度差作用下向海排泄与海水边界条件共同塑造了淡水透镜体的分布形态与岛礁地下水流速度场, 因此不同的降水条件会改变地下水流场驱动力的强弱进而导致石油迁移路径与扩散速率的变化。本研究以我国南海永兴岛近 60 年降水变化(图 7)为例^[44], 分别将其年平均降水量、最大降水强度以及最小降水强度的相关比例关系作为模型接受降水的边界条件, 旨在研究不同降水强度对石油污染物迁移扩散的驱动效果, 进一步了解不同补给条件下岛礁油库泄漏对地下水环境的影响。

根据图 7 数据可以得到永兴岛年降水量高值平均在 1 500 mm 左右, 低值平均在 240 mm 左右, 根据该降水量比例关系与本研究采取的平均降水量 2.4 mm/min, 选取模型强降水条件下降水量为 4.1 mm/min, 干旱条件下降水量为 0.6 mm/min, 根据以上条件建立 3 种污染模型, 旨在探究在地下水水流场强度变化对地下石油污染物迁移与淡水透镜体造成的影响。

2.2 不同性质油品污染过程模拟

本研究以岛礁建设储油相关工程为背景, 对于常规储油, 以柴油为例研究了 LNAPL 类石油污染物在岛礁淡水透镜体发育条件下的迁移规律及其对淡水水质水量的影响。然而由于密度引起的水油两相重力势差异是影响石油污染物迁移的主控因素, DNAPL 类石油污染物相关问题同样需要探究, 而且在岛礁地下水分布存在淡水与海水密度差异的条件下, 密度小

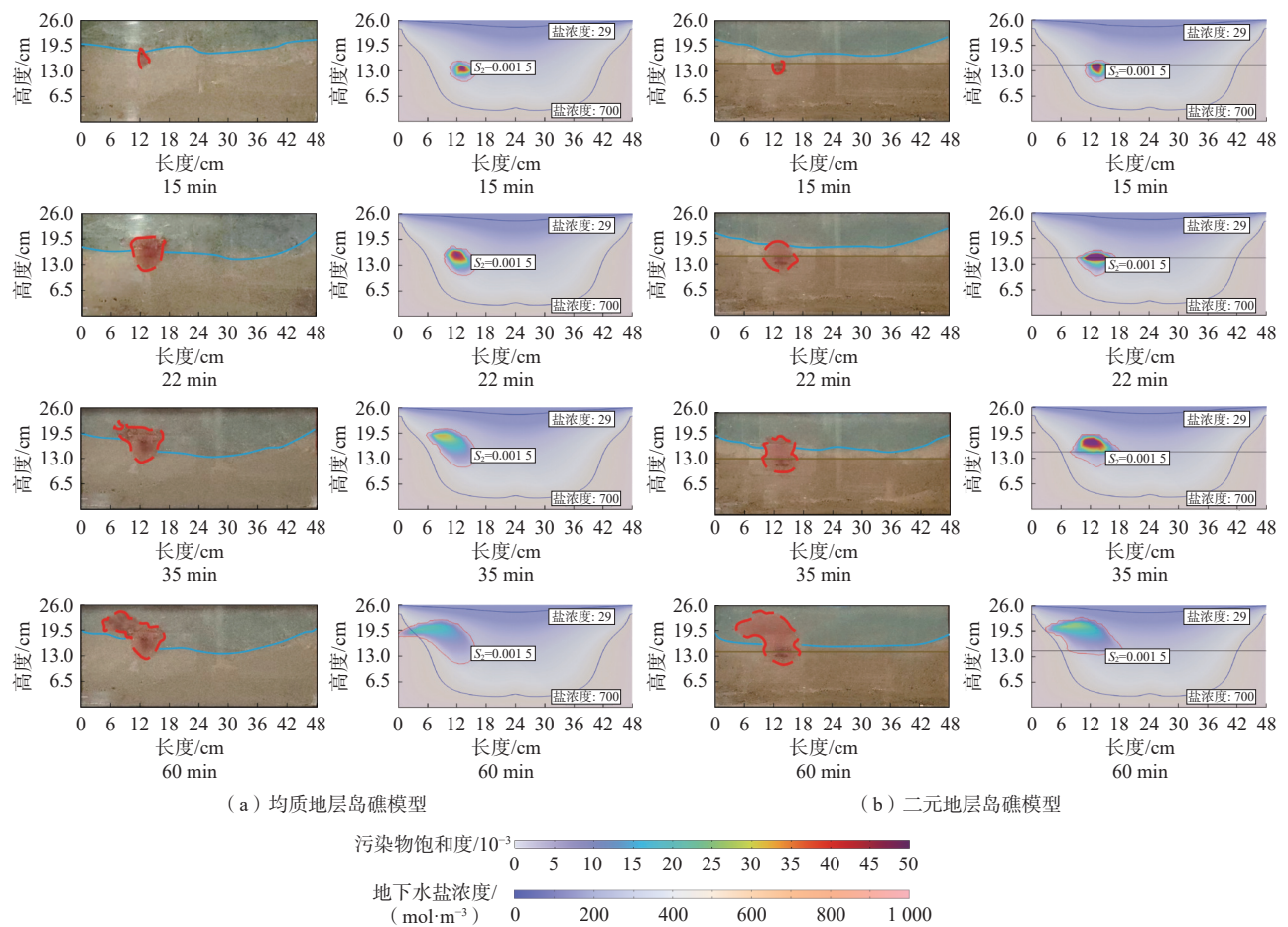


图 6 室内试验与数值模拟结果验证
Fig. 6 Validation between indoor experiment and numerical simulation

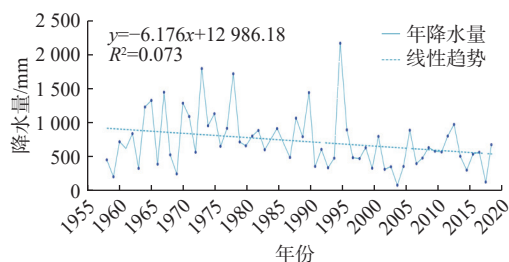


图 7 永兴岛年降水变化 (据文献 [42] 修改)
Fig. 7 Annual rainfall variation at Yongxing island (modified from Ref. [42])

于海水的超重质石油与密度大于海水的超重质石油将会有不同的迁移规律。因此另选取了 2 种 DNAPL 类石油污染物进行数值模拟研究, 相关参数见表 3。

表 3 2 种 DNAPL 类油品基本性质
Table 3 Basic properties of two DNAPL-type oils

石油种类	密度/(kg·m ⁻³)	动力黏度/(10 ⁻³ Pa·s)
第1种超重质石油($\rho_a < \rho_s$)	1 015	101.5
第2种超重质石油($\rho_a > \rho_s$)	1 050	105.0

注: 表中 ρ_a 为石油密度。

此外, 由于该类油品黏度远大于柴油, 其迁移速率极为缓慢, 因此研究采用了更长的时间尺度, 模拟总时长为 5 000 min。

3 分析与讨论

3.1 降水入渗强度对石油污染物迁移的影响规律

由图 8 可知, 对于强降水条件(降水速率为 4.1 mm/min), 在地下油库泄漏 620 s 后污染物迁移分布已呈现出明显的向海排泄趋势, 此时污染物在垂直方向上相比污染泄漏位置迁移了 7 cm, 与同时刻平均降水条件(降水速率为 2.4 mm/min)下垂直污染范围相当; 而在水平方向上则向左侧迁移了 8 cm, 大于同时刻平均降水条件下的污染物迁移范围。这体现出相较于平均降水条件, 强降水条件下地下水流场产生的向海排泄驱动力强于重力势对污染物的驱动效果, 石油污染向海排泄的趋势更强。在地下油库泄漏 1 800 s 后, 饱和度为 1.5×10^{-3} 的石油污染在水平方向上迁移至模型左侧海水边界, 比平均降水条件提前约 1 100 s。

此时污染范围相比于 620 s 时刻向左增加了 6 cm, 而垂直方向上污染范围仅增加了不到 1 cm。相比于平均降水条件, 该情景下垂直污染范围减少了 27%。对于干旱条件(降水速率为 0.6 mm/min), 从模拟结果可以看出: 与平均降水条件相比, 由于 LNAPL 相与水相重力势差异产生的污染物向上迁移驱动力强于动态地下水场驱动; 在 200 s 时刻, 污染范围与平均降水条件相比, 其水平范围相同, 而在垂直方向上则有所增加; 此后, 污染继续迁移, 其向上迁移的趋势大于向海排泄, 同时整体迁移速率相比于其他两种情况更为缓慢; 在地下油库污染泄漏后 6 950 s, 饱和度为 1.5×10^{-3} 的石油污染等值面抵达边界, 相比于平均降水条件延后 4 050 s, 此时污染垂直范围达到 14 cm, 相比于平均降水条件增加了 25%, 但污染等值面并未到达模型顶界, 说明其上方仍存在符合标准的淡水资源。上述结果体现了在干旱条件下重力势驱动力对污染物迁移的主导作用。

3.2 NAPL 类石油污染物迁移规律

对地下水中 NAPL 相饱和度大于 1.5×10^{-3} 定义的石油污染范围与盐浓度小于 29 mol/m^3 且 NAPL 相饱和度小于 1.2×10^{-6} 定义的淡水体积^[45] 在时间序列上进行体积分与数据处理, 得到两者随时间变化的规律。如图 9 所示, 3 种降水条件下石油污染范围在前期均迅速扩大, 其中强降水条件与平均降水条件污染范围最大值分别出现在 6 000 s 与 1.2×10^4 s 左右, 随后污染地下水中的扩散速率小于其向海排泄的速率, 污染范围逐渐减小。对于干旱条件, 由于地下水流场作用极弱, 污染向海排泄驱动力小, 其污染范围会不断增大直至 1.6×10^4 s 达到最大值, 随后逐渐减小。图 10 反映了 3 种降水条件下淡水体积的变化情况, 从稳态结果可以看出, 3 种条件下形成的稳定淡水体积与降水补给速率成正比, 这与前人的观点相符合^[13, 46]。强降水条件与平均降水条件下, 石油污染物在向上运移的过程中向海排泄, 在前期会对淡水透镜体底部产生轻微

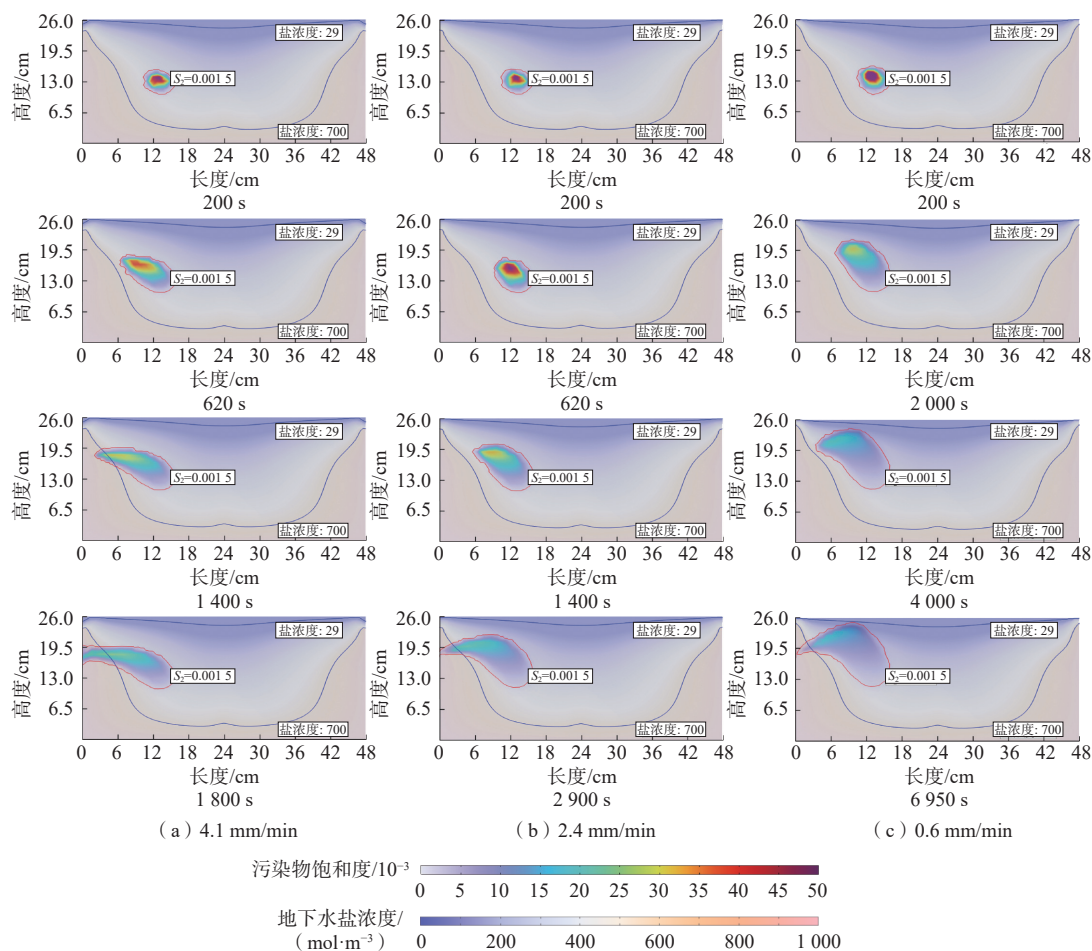


图 8 不同降水强度下石油污染物迁移结果
Fig. 8 Pollution migration under different rainfall intensities

污染,但整体来看淡水体积基本稳定,这说明在强动态地下水流场的作用下污染基本不会抵达上方淡水范围内。反观干旱条件下的淡水体积变化曲线,由于石油污染以垂直运移为主,在 9 700 s 时刻污染物运移至模型上方后入侵淡水透镜体,淡水体积开始减少。

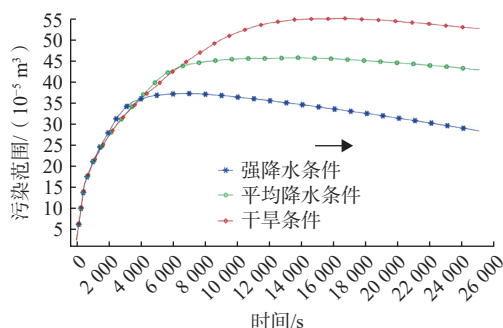


图 9 不同降水条件下石油泄漏后污染范围变化

Fig. 9 Changes in pollution spread after oil leakage under different rainfall conditions

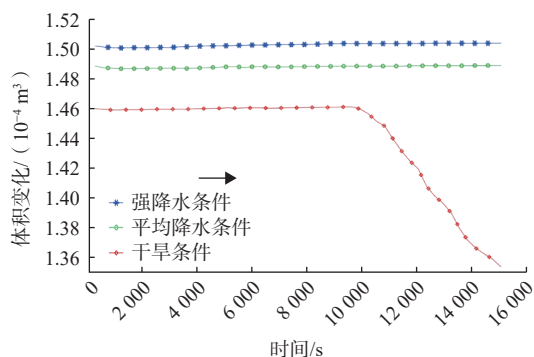


图 10 不同降水条件下淡水体积变化

Fig. 10 Changes in freshwater volume under different rainfall conditions

以上研究结果进一步证明了地下油库泄漏污染物迁移规律受两种主要驱动力控制,而这种影响规律与两种驱动力的相对强弱密切相关。对于强降水情景,一方面较大的降水量会形成更厚的淡水透镜体,这会改变岛礁地下水密度与流场空间分布,另一方面强降水条件强化了岛礁承接降水并向海排泄这一动态过程。在这两方面的作用下,地下水流场范围扩大,流速加快,因此该条件下动态地下水流场对污染物迁移的驱动作用占据主导作用。反之,对于干旱情景,地下水流场对污染物迁移的影响效果极大减弱,此时污染物迁移以重力势驱动的垂直迁移为主导。

3.3 DNAPL 类石油污染物迁移规律

通过先前的研究发现,岛礁地下水中 NAPL 相与水相的密度差异是重力势驱动污染物迁移的主要来源,因此可以判定 DNAPL 类石油污染物的迁移规律

将会不同于 LNAPL 类石油污染;此外,由于该类油品黏度远大于柴油,迁移速度极为缓慢,因此研究采用了更长的时间尺度,模拟总时长为 5 000 min。

淡水透镜体是岛礁地下水环境中漂浮在海水之上的一块淡水体,两者之间由于溶质交换与对流-弥散作用在垂直方向上存在着较大范围的咸淡水过渡带。对于密度小于海水的 DNAPL 类石油污染,在重力势作用下其污染扩散就会在海水与淡水交换处的过渡带范围内发生。如图 11 所示,地下油库泄漏后,污染在重力势驱动力作用下沿咸淡水过渡带向左侧迁移,其迁移扩散呈弧形,符合咸淡水过渡带的密度分布规律,但又由于地下水流场驱动污染向海排泄的作用,其整体扩散方向会向近海侧发生一定偏移。在 2 000 min 时刻,污染饱和度等值面抵达模型边界,石油饱和度梯度沿过渡带向左侧盐水楔处聚集,此时淡水透镜体水质水量并未受到污染影响。对于密度大于海水的 DNAPL 类石油污染物泄漏后在重力势的作用下会发生向下迁移,整体污染范围形态呈“液滴”形,符合 DNAPL 类石油污染物在饱和砂土中的运移规律^[9],同时由于污染途径仍经过岛礁地下水流场,因此石油在向下运移的过程中会在水平方向上进行向左偏移,又因模型下方地下水流速慢、动态流场不活跃,相比于 LNAPL 类石油污染物其水平偏移并不显著。此外由于模型底部为无流动边界,污染物最终会在下方汇聚。这类石油污染物相比 LNAPL 类石油与第一类超重质石油污染物所受地下水流场驱动作用极大减小,迁移规律以重力势驱动为主导。

由图 12 可知, LNAPL 类石油由于黏度低,污染物迁移速率快,同时在向上运移的过程中受动态地下水流场影响作用更强,其污染范围在前 220 min 迅速增大,随后在向海排泄与弥散稀释的作用下,污染范围逐渐减小。而 2 种 DNAPL 类石油由于黏度远大于地下水,其在地下水中的迁移速率远低于 LNAPL 类石油,因此污染扩散过程十分缓慢,污染范围在 2 000 min 之后基本达到最大值,之后趋于稳定,直至 5 000 min 时刻, DNAPL 类石油污染物污染范围仍没有显著减小,这说明岛礁地下水流场对 DNAPL 类石油污染物的衰减作用显著降低。图 13 反映了 3 类不同油品下淡水体积的变化情况,可以看出在平均降水条件下, DNAPL 类油品污染物对淡水透镜体的体积无显著影响,而 LNAPL 类油品污染物由于密度小于水相持续向上迁移,在 780 min 后开始入侵淡水透镜体导致淡水体积减少。整体来说,对于密度大于 1 000 kg/m³ 的

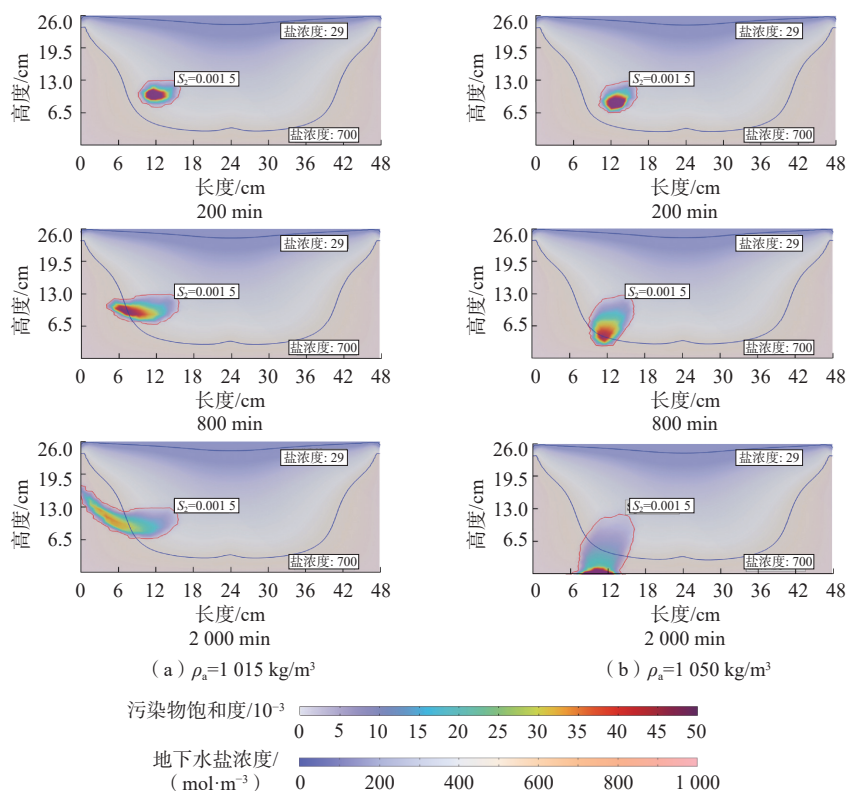


图 11 2 种 DNAPL 类石油泄漏污染规律

Fig. 11 Pollution patterns of two DNAPL-type oil leaks

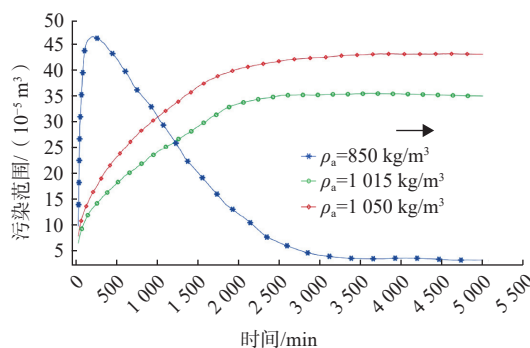


图 12 不同种类石油泄漏后污染范围变化

Fig. 12 Changes in pollution spread after different types of oil leaks

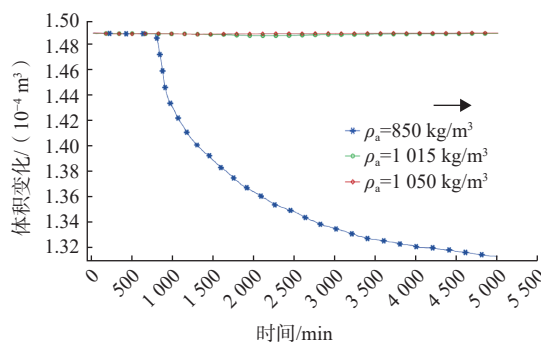


图 13 不同种类石油泄漏后淡水体积变化

Fig. 13 Changes in freshwater volume after different types of oil leaks

超重质类石油泄漏情景,其污染范围仍然受重力势与动态地下水流场两种驱动力影响,但迁移规律各有其典型特征,同时位于淡水透镜体发育处以下的该类油品油库泄漏不会对淡水透镜体水质水量造成显著影响。

4 结论

(1)珊瑚岛礁水文地质条件下的石油污染物迁移主要受两种驱动力的影响,一是由于油水两相自身密度差异产生重力势所导致的石油向上迁移的垂向驱动力;二是在降水入参与海洋边界条件的共同作用下产生的动态地下水流场驱动力,主要体现为石油污染

随地下水流速度场迁移并最终向海排泄,两种驱动力共同塑造了岛礁地下油库泄漏的污染物迁移规律。此外,二元地质岛礁的不整合面会使石油污染积聚并发生水平扩散,从而使污染范围整体扩大。

(2)对于动态地下水流场产生的污染物迁移驱动力,其驱动效果在空间上与淡水透镜体发育形态密切相关,位于过渡带以上的区域咸淡水交换作用强,地下水流速较高,动态流场较为活跃。反之,过渡带以下区域咸淡水交换作用弱,地下水流场对污染物迁移的影响作用较小。

(3)降水作为淡水透镜体的唯一来源,也是岛礁

形成高度动态地下水流动的基础,与平均降水条件相比,强降水条件会形成体积更大的淡水透镜体与动态性更强的地下水流动场,因此会强化第二种污染驱动力;相反,干旱条件下,岛礁地下水承接降水补给少,地下水流动场不活跃,地下 LNAPL 类石油泄漏主要发生向上运移最终入侵淡水透镜体。

(4)在两种驱动力的作用下,密度小于海水的 DNAPL 类石油会在咸淡水过渡带处迁移并向海排泄,密度大于海水的 DNAPL 类石油则会向下迁移同时向近岸边界发生轻微偏移,同时较高的动力黏度使其迁移扩散速率十分缓慢。此外,两者均不会对淡水透镜体水质水量造成显著影响。

参考文献 (References):

- [1] 姚宇,钟翔.岛礁水沙动力学研究综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(4):1-10. [YAO Yu, ZHONG Xiang. A review of water-sediment dynamics around the reef islands[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(4): 1-10. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈韶阳,龚彦维.海岛振兴视角下的南海发展格局构想[C]//中国海洋发展研究会应用海洋学分会,天津大学海洋战略研究所,天津大学海洋科学与技术学院.我国海洋可持续发展与海岛振兴战略研讨论文集.天津:天津大学海洋科学与技术学院,2023:10. [CHEN Shaoyang, GONG Yanwei. Conceptualization of the Development Pattern in the South China Sea from the Perspective of Island Revitalization[C]// Proceedings of the Symposium on Sustainable Development of the Ocean and the Strategy of Island Revitalization in China organized by the Applied Oceanography Branch of China Society of Oceanography, Institute of Ocean Strategy at Tianjin University, School of Marine Science and Technology at Tianjin University. Tianjin: School of Marine Science and Technology, Tianjin University, 2023: 10. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 周从直,方振东,魏莹,等.珊瑚岛礁淡水透镜体的开发利用[M].重庆:重庆大学出版社,2017:415. [ZHOU Congzhi, FANG Zhendong, WEI Ying, et al. Development and Utilization of Freshwater Lenses in Coral Reefs[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2017: 415. (in Chinese)]
- [4] 王玉慧.南海岛礁建设的生态保护法律问题研究[D].海口:海南大学,2019. [WANG Yuhui. A study on legal issues of ecological protection in the construction of islands and reefs in the South China Sea [D]. Haikou: Hainan University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 林昆勇,余克服.基于我国珊瑚礁探测历史的南海岛礁主权维护路径研究[J].广西大学学报(哲学社会科学版),2018,40(1):106-112. [LIN Kunyong, YU Kefu. Research on the path of sovereignty maintenance of islands and reefs in the South China Sea based on the detection history of coral reefs in China[J]. Journal of Guangxi University (Philosophy and Social Science), 2018, 40(1): 106-112. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘玄宇,刘云刚.中国南海海洋国土开发与管控研究展望[J].自然资源学报,2021,36(9):2205-2218. [LIU Xuanyu, LIU Yungang. The development and regulation of marine territory in the South China Sea, China: Review and prospect[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(9): 2205-2218. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郎梦凡,欧阳卓智,郭学涛.石油烃在土壤中迁移的研究进展[C]//中国环境科学学会环境工程分会.中国环境科学学会2022年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(四).咸阳:西北农林科技大学,2022:7. [LANG Mengfan, OUYANG Zhuozhi, GUO Xuetao. Research progress on the migration of petroleum hydrocarbons in soil[C]//Environmental Engineering Branch, Chinese Society for Environmental Sciences. Proceedings of the 2022 Annual Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences: Environmental Engineering Technology Innovation and Application Branch (Session Four). Xi'an: Northwest A&F University, 2022: 7. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 钱程,穆文平,邢渊,等.某气田石油类污染物运移数值模拟研究[J].环境工程,2016,34(4):68-72. [QIAN Cheng, MU Wenping, XING Yuan, et al. Numerical simulation of petroleum contaminant transport in a field[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(4): 68-72. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 肖鹏,刘汉乐.饱和砂土中DNAPL污染物迁移过程及数值模拟[J].中国环境科学,2024,44(1):386-395. [XIAO Peng, LIU Hanle. Transport processes and numerical simulation of DNAPL contaminants in saturated sandy soils[J]. China Environmental Science, 2024, 44(1): 386-395. (in Chinese with English abstract)]
- [10] SULAYMON A H, GZAR H A. Experimental investigation and numerical modeling of light nonaqueous phase liquid dissolution and transport in a saturated zone of the soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3):1601-1614.

- [11] 周从直, 何丽, 杨琴, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体三维数值模拟研究 [J]. 水利学报, 2010, 41(5): 560 – 566. [ZHOU Congzhi, HE Li, YANG Qin, et al. Three-dimensional numerical simulation of freshwater lens in coral islands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 560 – 566. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 黎大宁. 永兴岛淡水透镜体的季节特征及影响因素 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019. [LI Daning. Seasonal characteristics and influencing factors of freshwater lens in Yongxing Island[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [13] WERNER A D, SHARP H K, GALVIS S C, et al. Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 819 – 844.
- [14] SHENG C, HAN D M, XU H H, et al. Evaluating dynamic mechanisms and formation process of freshwater lenses on reclaimed atoll islands in the South China Sea[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 584: 124641.
- [15] YAO Yingying, ANDREWS C, ZHENG Yan, et al. Development of fresh groundwater lens in coastal reclaimed islands[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 365 – 375.
- [16] 王新志. 南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008. [WANG Xinzhi. Geological Characteristics and feasibility study of large-scale engineering construction on coral reefs in the Nansha Islands [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [17] YANG Jie, GRAF T, LUO Jian, et al. Effect of cut-off wall on freshwater storage in small islands considering ocean surge inundation[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127143.
- [18] TANG Yuening, YAN Min, WANG Xiaoxiong, et al. Experimental and modeling investigation of pumping from a fresh groundwater lens in an idealized strip island[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126734.
- [19] 汪晗. 珊瑚岛礁地下构筑物建设对淡水透镜体影响研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2023. [WANG Han. Study on the impact of underground construction on freshwater lenses in coral islands[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [20] POST V E A, BOSSERELLE A L, GALVIS S C, et al. On the resilience of small-island freshwater lenses: Evidence of the long-term impacts of groundwater abstraction on bonriki island, Kiribati[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 133 – 148.
- [21] 马婧, 鲁春辉, 吴吉春, 等. 一种可增加海岛地下淡水资源储量的方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 1 – 7. [MA Jing, LU Chunhui, WU Jichun, et al. A method for improving the fresh groundwater storage of oceanic islands[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 黄云, 胡其高, 张硕云. 南海海洋环境对岛礁工程结构与设施影响研究 [J]. 国防科技, 2018, 39(3): 50 – 63. [HUANG Yun, HU Qigao, ZHANG Shuoyun. Research on the marine environmental impact on reef structures maintenance[J]. *Defense Technology Review*, 2018, 39(3): 50 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张增湘. 三沙市永兴社区建设与治理问题研究 [D]. 海口: 海南大学, 2018. [ZHANG Zengxiang. Research on the construction and governance issues of Yongxing Community in Sansha City [D]. Haikou: Hainan University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 盛冲, 许鹤华, 张文涛. 地貌变化对永兴岛淡水透镜体影响的数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 7 – 14. [SHENG Chong, XU Hehua, ZHANG Wentao. Numerical simulation of the effect of geomorphologic changes on freshwater lens in the Yongxing Island[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 7 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 吴照群. 非水相流体在土体中运移的数值模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2008. [WU Zhaoqun. Numerical simulation of non-aqueous fluid migration in soil[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese with English abstract)]
- [26] YAN Min, LU Chunhui, WERNER A D, et al. Analytical, experimental, and numerical investigation of partially penetrating barriers for expanding island freshwater lenses[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(3): e2020wr028386.
- [27] FETTER C W J. Position of the saline water interface beneath oceanic islands[J]. *Water Resources Research*, 1972, 8(5): 1307 – 1315.
- [28] VACHER H L. Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(4): 580 – 591.
- [29] STOECKL L, HOUBEN G. Flow dynamics and age stratification of freshwater lenses: Experiments and modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 458: 9 – 15.

- [30] DOSE E J, STOECKL L, HOUBEN G J, et al. Experiments and modeling of freshwater lenses in layered aquifers: Steady state interface geometry[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 509: 621 – 630.
- [31] LI Yuxi, SHU Longcang, ZHEN Li, et al. Laboratory physical experiments on the saltwater upconing and recovery of island freshwater lenses: Case study of a coral island, China[J]. *Water*, 2021, 13(9): 1137.
- [32] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 3号喷气燃料: GB 6537—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. No. 3 jet fuel: GB 6537—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)]
- [33] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 船用燃料油: GB 17411—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Marine fuel oils: GB 17411—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. (in Chinese)]
- [34] 夏湘黔. 氡示踪技术评估土壤 NAPL 污染的理论及实验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2019. [XIA Xiangqian. Theoretical and experimental study on evaluation of soil NAPL pollution by radon tracer technology[D]. Hengyang: University of South China, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [35] LUO Zirong, LI Dandan, TAN Shaozao, et al. Preparation and oil-water separation of 3D kapok fiber-reduced graphene oxide aerogel[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2020, 95(3): 639 – 648.
- [36] SHARAWI A A, HAMODA E A, KARRAR A A. Evaluation of a numerical model using comsol multi-physics package[C]// 2015 Fifth International Conference on e-Learning. New York: IEEE, 2015: 42–46.
- [37] WANG Xiaopu, HOU Lianjie, HE Tianhao, et al. Numerical simulation of the enrichment of chemotactic bacteria in oil-water two-phase transfer fields of heterogeneous porous media[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(10): 5215.
- [38] SHENG Chong, JIAO J J, XU Hehua, et al. Influence of land reclamation on fresh groundwater lenses in oceanic islands: Laboratory and numerical validation[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(10): e2021wr030238.
- [39] BANSAL R K. Groundwater fluctuations in sloping aquifers induced by time-varying replenishment and seepage from a uniformly rising stream[J]. *Transport in Porous Media*, 2012, 94(3): 817 – 836.
- [40] 李英豪, 韩冬梅, 曹天正, 等. 边坡防渗增加灰沙岛地下淡水的试验与数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(2): 13 – 22. [LI Yinghao, HAN Dongmei, CAO Tianzheng, et al. A study of the increase in subsurface freshwater on coral islands by slope seepage control: Experiment and modeling[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(2): 13 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 周从直, 方振东, 梁恒国, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体的数值模[J]. *海洋科学*, 2004, 28(11): 77 – 80. [ZHOU Congzhi, FANG Zhendong, LIANG Hengguo, et al. Numerical simulation of freshwater lens on coral island[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(11): 77 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [42] LI Tingwei, JIANG Zhenxue, XU Chenlu, et al. Effect of pore structure on shale oil accumulation in the lower third member of the shahejie formation, Zhanhua Sag, Eastern China: Evidence from gas adsorption and nuclear magnetic resonance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 932 – 949.
- [43] 樊龙凤, 李海英, 叶许春. 海岛淡水透镜体研究进展及可持续发展展望[J]. *水资源研究*, 2019(2): 199 – 208. [FAN Longfeng, LI Haiying, YE Xuchun. Review and prospect of sustainable development of island freshwater lens[J]. *Journal of Water Resources Research*, 2019(2): 199 – 208. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 周宇, 凌芬曼, 施晨晓. 近 60 年永兴岛热带气旋降水的气候特征分析[J]. *气象科技*, 2021, 49(1): 69 – 76. [ZHOU Yu, LING Fenman, SHI Chenxiao. Climatic features of rainfall induced by tropical cyclones in Yongxing Island in recent 60 years[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2021, 49(1): 69 – 76. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water: GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)]
- [46] WHITE I, FALKLAND T. Management of freshwater lenses on small Pacific islands[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(1): 227 – 246.