

非等温条件下截渗工程对海底地下水排泄的影响研究

郑天元, 辛 晓, 王 和, 高绍博, 刘乐成, 张 博, 郑西来, 罗 剑

Effect of cut-off walls on submarine groundwater discharge in non-isothermal conditions

ZHENG Tianyuan, XIN Xiao, WANG He, GAO Shaobo, LIU Lecheng, ZHANG Bo, ZHENG Xilai, and LUO Jian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202408027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水力屏障和截渗墙在海水入侵防治中的数值模拟研究

A numerical simulation study for controlling seawater intrusion by using hydraulic and physical barriers

吕盼盼, 宋健, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 32-40

海水入侵模拟方法VFT3D及应用

Development and application of sea water intrusion models

王佳琪, 郭芷琳, 田勇, 范林峰, 曾文科, 王晓丽, 苏, Michele Lancia, 郑春苗 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 184-194

“引哈济党”工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波, 李玉山, 胡立堂, 尹政, 胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50

云应盆地东北部含水层结构特征及地下水转化模式

Characteristics of the aquifer structure and groundwater conversion model in the northeastern Yunying Basin

常威, 黄琨, 胡成, 王清, 王宁涛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 9-15

高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述

Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste

李露露, 张秋兰, 李星宇, 张璜, 崔亚莉, 邵景力 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 43-53



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202408027

郑天元, 辛晓, 王和, 等. 非等温条件下截渗工程对海底地下水排泄的影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 1-11.
ZHENG Tianyuan, XIN Xiao, WANG He, et al. Effect of cut-off walls on submarine groundwater discharge in non-isothermal conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 1-11.

非等温条件下截渗工程对海底地下水排泄的影响研究

郑天元^{1,2}, 辛 晓^{1,2}, 王 和³, 高绍博^{1,2}, 刘乐成^{1,2}, 张 博⁴, 郑西来^{1,2}, 罗 剑⁵

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋环境地质工程
重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学三亚海洋研究院, 海南 三亚 572000;
4. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;
5. 美国佐治亚理工学院土木与环境工程系, 佐治亚州 亚特兰大 30332)

摘要: 温度变化会影响海岸带地下水运移特征, 但之前关于截渗工程条件下地下水排泄过程的研究仅限于等温条件, 没有考虑非等温过程的影响。文章构建了场地尺度的二维地下水-盐-热耦合数值模型, 探究非等温条件下截渗墙对地下水排泄过程的影响, 重点关注地下水排泄动态变化特征与温度的关系, 采用地下水排海通量(Q)与相对排泄量(Q')定量评价海水温度对地下水排海通量的影响。研究结果表明: (1) 在高温海水条件下, Q' 达到平衡的时间显著缩短; (2) 海水温度变化会改变截渗墙与咸水楔对地下水渗流的影响程度; (3) 低温海水情况下咸水楔对地下水渗流的阻碍作用大于墙体本身, 而高温海水条件下截渗墙的阻碍效果更为显著; (4) 海水温度高于地下水 15 °C 时, 咸水区内更易产生并维持反向环流, 导致咸水区地下水循环加速, 进而增加地下水排海总量。研究成果可为截渗工程结构优化和滨海地下水资源可持续利用提供重要技术支撑。

关键词: 海水入侵; 热效应; 滨海含水层; 数值模拟

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0001-11

Effect of cut-off walls on submarine groundwater discharge in non-isothermal conditions

ZHENG Tianyuan^{1,2}, XIN Xiao^{1,2}, WANG He³, GAO Shaobo^{1,2}, LIU Lecheng^{1,2}, ZHANG Bo⁴,
ZHENG Xilai^{1,2}, LUO Jian⁵

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Qingdao, Shandong 266100, China; 3. Sanya Ocean Institute, Ocean University of China, Sanya, Hainan 572000, China; 4. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 5. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA)

Abstract: Temperature could change the migration characteristics of coastal groundwater. However, research on

收稿日期: 2024-08-21; 修订日期: 2024-09-24

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272282)

第一作者: 郑天元(1988—), 男, 博士, 教授, 主要从事滨海水文地质研究工作。E-mail: zhengtianyuan@ouc.edu.cn

groundwater discharge processes under the influences of cut-off walls has been limited to isothermal conditions. This study built a two-dimensional numerical model coupling groundwater flow and salt transport in non-isothermal conditions at the site scale to investigate the impact of cut-off walls on groundwater discharge processes, considering the thermal effect. We focused on the dynamic characteristics of submarine groundwater discharge in non-isothermal conditions which are common in reality. This research quantitatively assessed the influence of seawater temperature on groundwater discharge flux (Q) and relative discharge flux (Q'). The results indicate that, under high-temperature seawater conditions, the timescale for Q' to reach equilibrium is significantly reduced. Specifically, higher freshwater temperatures and lower seawater temperatures could result in a greater Q' . However, when the seawater temperature exceeded the groundwater temperature by 15°C, reverse circulation is more likely to develop in the saltwater zone, which accelerates groundwater circulation and increases the total groundwater discharge into the sea, resulting in a corresponding rise in the Q' value. This study is significant for cut-off wall structure optimization and coastal groundwater sustainable utilization.

Keywords: seawater intrusion; thermal effect; coastal aquifer; numerical simulation

全世界约 70% 的人口生活在沿海地区, 高人口密度及工农业生产对淡水资源的需求巨大, 导致地下水被过度开采、地下水位持续下降^[1-2]。这种现象减小了近岸地下水和海水之间的水头差, 促使海水沿含水层向内陆方向渗透, 最终引起海水入侵^[3-4]。海水入侵会导致地下水质恶化、土壤盐渍化, 并威胁当地的工农业生产和生态环境, 成为制约沿海地区经济发展的重要因素之一^[1, 5]。

截渗墙作为防治海水入侵的主要措施之一, 是在含水层的底部建造隔水墙, 并在顶部留有开口。这样既可以控制咸水楔向内陆扩展, 又保证一定量的地下水向海洋排泄。该工程对生态环境的影响较小, 运行成本较低, 且不占用地表面积^[6-8]。自 20 世纪 80 年代以来, 截渗墙技术在中国、日本、韩国和印度等许多国家得到了广泛应用和改进^[9-11]。滨海地下水在水力梯度的驱动下由内陆向海底排泄的过程是全球水循环的一个重要组成部分^[12-13]。在许多沿海地区, 地下水排海通量能达到地表径流的数倍^[14-15]。值得注意的是, 地下水排泄过程与近海区域以及地下水的水质状况密切相关^[16]。地下水中的可溶性陆源污染物会随排泄过程进入海洋^[17-18], 降低其在含水层富集污染的风险, 而截渗墙的不透水特性在一定程度上会阻碍地下淡水排泄, 如果设计不当, 可能造成地下水质恶化^[19]。例如早期修建的截渗墙通常灌注很深, 部分甚至直达地表, 成为全剖面式截渗墙, 严重阻碍甚至切断了地下淡水的排泄途径, 使地下淡水的循环和自净受到影响, 地下水中的陆源污染物不断积累, 最终导致地下水质恶化甚至破坏地下水环境^[20]。而 Chang 等^[16]通过室内试验和数值模拟探究了截渗墙对地下淡水排泄

的影响, 发现具有最小有效高度的截渗墙可以有效防治海水入侵, 同时保持最大的地下水排泄量。

海水和沿海地下水之间普遍存在着温度差。Benz 等通过卫星获取的地表温度显示, 全球沿海海水温度 (T_s) 范围在 0 ~ 37 °C 之间, 且随着季节变化^[21]。而地下水由于埋藏在含水层中, 温度 (T_f) 几乎没有季节性变化, 但是根据 Benz 等^[21]的预测, 全球海岸带沿岸的地下水温度范围为冷冻温度 (0 °C) 至 40 °C。不同地区地下水温度本身是不一样的, 两者的温差范围 (ΔT) 为 -15 ~ 15 °C 之间^[22]。由于温度会改变流体的密度和黏度等物理性质, 所以海水-地下水温度差会对海底地下水排泄产生很大的影响^[23-24]。Pu 等^[25]通过室内试验与数值模拟研究发现, 在定流量边界条件下, 当淡水温度升高或海水温度降低时, 咸淡水界面向陆地深入; 当海水温度超过地下水温度时, 盐-热双重扩散会在咸水楔中诱导两个相反方向的咸水环流, 海水循环通量和时间会发生显著变化。综上所述, 截渗墙对地下水动力过程的影响已逐渐受到关注, 但目前对截渗墙影响下滨海地下水排泄特征的研究仅限于等温条件, 没有考虑墙后滨海地下水排泄的温度效应。因此, 本研究旨在明确非等温条件下地下水排泄的动力学机制, 为滨海地区截渗工程建设和地下水资源可持续利用提供科学依据。

1 模型建立与模拟方法

1.1 水文地质模型的概化

滨海含水层环境极其复杂, 在研究中通常会简化其真实环境, 构建概化模型^[5, 8, 20]。为了定量评价温度效应对截渗墙条件下地下水渗流与排泄过程的影响,

本文参考以往关于潜水含水层海水入侵研究中的含水层条件,并做出以下假设:(1)含水层渗透率一致;(2)流体和含水层均不可压缩;(3)流体密度和动力黏滞系数随温度和盐度变化。水文地质概念模型如图 1 所示。模型为 400 m×50 m 的含水层剖面。左侧为咸水边界,水头恒定设置为 47.7 m(h_s),质量浓度设置为

35 g/L(C_s);右侧地下淡水边界水头恒定设置为 49.5 m (h_t),质量浓度设置为 0 g/L(C_t);两边的咸淡水边界均为定水头边界,顶部和底部均设置为无流动边界。热量与溶质运移方面的参数取值均参考以往场地尺度研究,如表 1 所示^[9, 22, 25]。

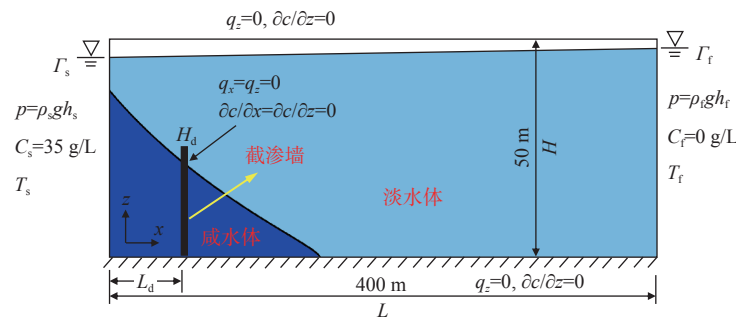


图 1 概念模型示意图
Fig. 1 Conceptual model

表 1 模拟参数^[9, 20, 23]
Table 1 Parameter values

模型参数	参数取值	单位
含水层厚度(H)	50	m
含水层长度(L)	400	m
有效孔隙度(n)	0.4	—
水力梯度(dh/dL)	4.0	‰
淡水质量浓度(C_t)	0	g/L
咸水质量浓度(C_s)	35	g/L
渗透率(k_s)	2×10^{-11}	m^2
纵向弥散度(α_L)	1.00	m
横向弥散度(α_T)	$0.1\times\alpha_L$	m
多孔介质导热系数(λ)	0.6	J/(m·°C·s)
流体导热系数(λ_p)	3.5	J/(m·°C·s)
固体骨架比热容(c_{pp})	4 182	J/(kg·°C)
流体比热容(c_p)	840	J/(kg·°C)
固体骨架密度(ρ_p)	2 650	kg/m ³

以往关于非等温条件下滨海含水层海水入侵的研究中淡水温度通常设为 20~35℃,低温海水通常设为 5~15℃,高温海水通常设为 35~40℃,而咸淡水温度差通常设为-15~15℃之间^[22, 25-26]。因此在本研究中,一方面考虑到整个过程中起到主要作用的是咸淡水温度差的绝对值,另一方面考虑到参数设置应体现代表性以及覆盖现实中存在的各类情形,将地下水温度(T_t)设为 20℃,设置不同海水温度(T_s),分别模拟等温条件($T_s=20℃$),高温海水条件($T_s=35℃$)与低温海水条件($T_s=5℃$),之后将海水温度设为 20℃,将地下水温度范围设为 5~35℃,模拟地下水温度不同的含水层。

本研究共设置建墙前和建墙后两个应力期进行模拟,将建墙前稳定后的盐度和温度分布状态作为建墙后的初始条件,并在距咸水边界 70 m 处(L_d)建造截渗墙,高度设置为 26 m(H_d),墙厚度为 1 m,渗透系数设为 10^{-9} m/s。

1.2 模拟方法

依据上述定解条件,借助多物理场模拟软件 COMSOL,对数值模型中的变密度饱和地下水流、溶质运移及热传导问题进行求解。该模型区域由 400×50 个大小为 $\Delta x\times\Delta z=1\text{ m}\times1\text{ m}$ 的均匀矩形网格单元离散化。

滨海地区地下水渗流计算是海水入侵数值模拟的基础,其中地下水运动微分方程是地下水渗流场计算的基础。根据质量守恒和动量守恒的假设,理查兹方程写为:

$$\rho\left(\frac{C_m}{\rho g}+S_e S\right)\frac{\partial p}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u})=Q_m \tag{1}$$

$$\boldsymbol{u}=-\frac{k_s}{\mu}k_r(\nabla p+\rho \boldsymbol{g}) \tag{2}$$

- 式中: Q_m ——流体源/汇项/($m^3\cdot s^{-1}$);
 $\boldsymbol{u}$ ——达西通量速度/($m\cdot s^{-1}$);
 k_s ——渗透率/ m^2 ;
 μ ——流体黏度/(Pa·s);
 ρ ——区域内的流体密度/($kg\cdot m^{-3}$);
 S ——饱和储水系数;
 S_e ——有效饱和度;

k_r ——相对渗透率;

C_m ——容水度/($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$);

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

不考虑源汇项的条件下,单位宽度的溶质运移方程和热传递方程写为^[27]:

$$\frac{\partial(\varepsilon_p C)}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{J} = -(\mathbf{D}_D + \frac{\varepsilon_p}{\tau_F} \mathbf{D}_F) \nabla C \quad (4)$$

式中: C ——溶质浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$);

ε_p ——孔隙率;

$\mathbf{J}$ ——流体动力弥散率/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),由机械弥散率 $\mathbf{D}_D$ (在本文假设其为各向同性)和盐的分子扩散率 $\mathbf{D}_F$ 组成;

τ_F ——由米林顿-夸克模型修正的有效系数,由 $\tau_F = \varepsilon_p^{-1/3}$ 定义。

$$\rho(T, S) = (999.9 + 2.034 \times 10^{-2} T - 6.12 \times 10^{-3} T^2 + 2.261 \times 10^{-5} T^3 - 4.657 \times 10^{-8} T^4) + \left[802.0 \frac{S}{1000} - 2.001 \frac{S}{1000} T + 1.677 \times 10^{-2} \frac{S}{1000} T^2 - 3.06 \times 10^{-5} \frac{S}{1000} T^3 - 1.613 \times 10^{-5} \left(\frac{S}{1000} \right)^2 T^2 \right] \quad (7)$$

运动黏度 $\mu(T, S)$ 采用式(8)计算^[27]:

$$\mu(T, S) = 2.394 \times 10^{-5} \times 10^{\frac{248.37}{T+133.15}} (1 + 1.85S - 4.1S^2 + 44.5S^3) \quad (8)$$

渗透系数 K_f 采用式(9)计算:

$$K_f = k_s \frac{\rho g}{\mu} \quad (9)$$

1.3 评价指标

地下水流量的变化用相对排泄量(Q')^[28]评价。 Q' 的定义如下:

$$Q' = \frac{Q}{Q_0} \quad (10)$$

式中: Q_0 ——第一应力期结束后地下水场稳定时的地下水排海通量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q ——建墙后的地下水排海通量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)。

因此,流场达到平衡状态时 Q' 的大小反映了初始状态下的咸水楔与墙体对地下水流阻碍作用的强度对比。当 Q' 大于100%时说明初始状态下的咸水楔对地下水流速的阻碍作用更强,而当 Q' 小于100%时则表示墙体对地下水流速的阻碍作用更强。

2 结果与分析

2.1 等温条件下地下水流场的动态变化特征

在等温条件下,建墙后不同时刻的地下水流场分

在不考虑压力做功、热扩散和源/汇的情况下,单位宽度内的传热控制方程为:

$$[\varepsilon_p \rho_p c_{p,p} + (1 - \varepsilon_p) \rho c_p] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = -[(\varepsilon_p k_p + (1 - \varepsilon_p) k) \nabla T] \quad (6)$$

式中: ρ_p ——多孔介质的密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

$c_{p,p}$ ——多孔介质的比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

c_p ——流体的比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

$\mathbf{q}$ ——热流量/($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$);

k_p ——流体的导热系数/($\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);

k ——固体的导热系数/($\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。

Jamshidzadeh 和 Van 均提出将总流体质量的弥散流体通量引入密度驱动流量方程,以改进多孔介质中的热-盐运移模型^[25]。在研究传热模块时,本文考虑密度 $\rho(T, S)$ 与流体温度 T 、盐度 S 的非线性关系,采用修正后的公式计算,见式(7)^[22]:

布如图2所示。初始状态(0 a)时,咸水楔处于稳定的入侵状态,整体流速较低,几乎保持不动。此时,流场可分为两部分:一是大陆侧的地下淡水沿隔水底板向海洋方向水平流动;二是由于咸水楔的影响,淡水的流通截面逐渐减小,在咸水楔上方集中并加速流动,形成了地下水的高速带,最终排向海洋。

在截渗墙($H_d=26 \text{ m}$, $L_d=70 \text{ m}$)建成后,原有地下水的排泄通道受到挤压,咸淡水的动态平衡被打破,地下水排泄量显著下降,流场发生了明显变化。地下水沿咸水楔方向流动,遇到截渗墙后流速减缓,流向改变,在墙体上方形成新的高速流区。水流越过墙体后,先向下斜流动,再沿混合区进入海洋。约2 a后,新排泄通道逐步稳定;25 a后,随着残留咸水逐渐被淡水替代,咸水楔范围缩小,对地下水的阻挡作用减弱,墙右侧咸水流速增大。至40 a时,地下水几乎垂直向墙体,穿过后沿混合区进入海洋。截渗墙条件下,地下水受到墙体和残留咸水楔两者的阻碍作用,且随着残留咸水的去除,阻碍作用逐渐下降;在残留咸水清除后,地下水仅受到墙体的阻碍作用。

2.2 不同海水温度条件下地下水流场的动态变化特征

不同海水温度条件下,截渗墙($H_d=26 \text{ m}$, $L_d=70 \text{ m}$)建成后含水层渗透系数随时间变化如图3所示。5 °C海水条件下(图3b),由于温度较低,地下水平均流速

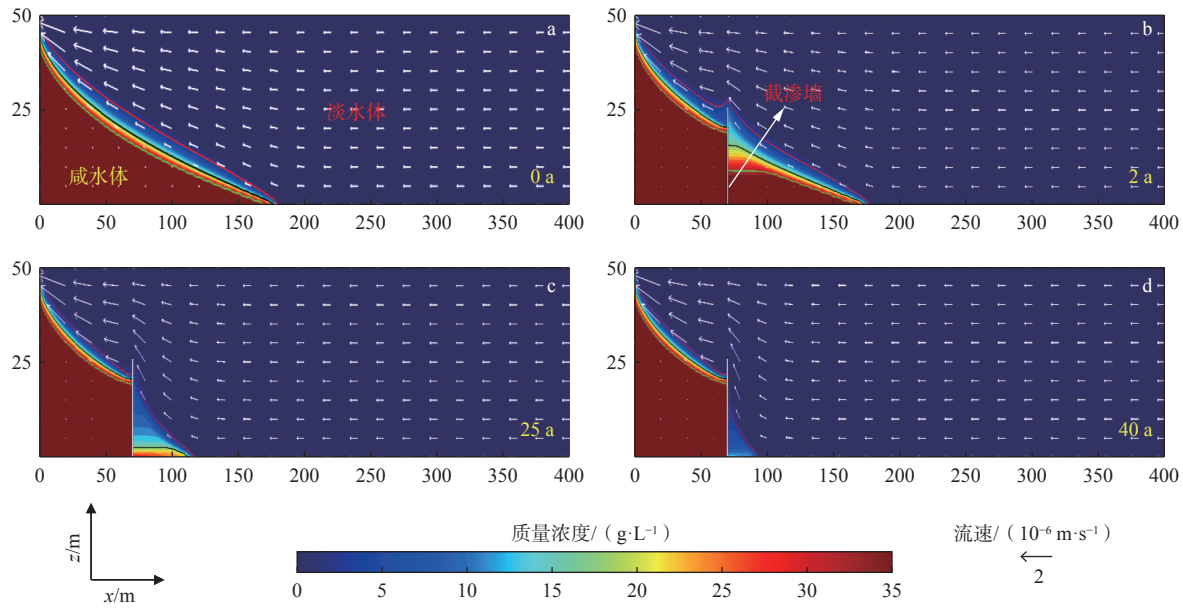


图2 等温条件下在距海边界 70 m 处建造 26 m 高截渗墙后经过 0, 2, 25, 40 a 残留咸水楔的浓度和流场分布

Fig. 2 Transient distributions of groundwater flow and saltwater wedge after installation of 26 m-height wall at 70 m from the sea boundary for 0, 2, 25, 40 years under isothermal conditions

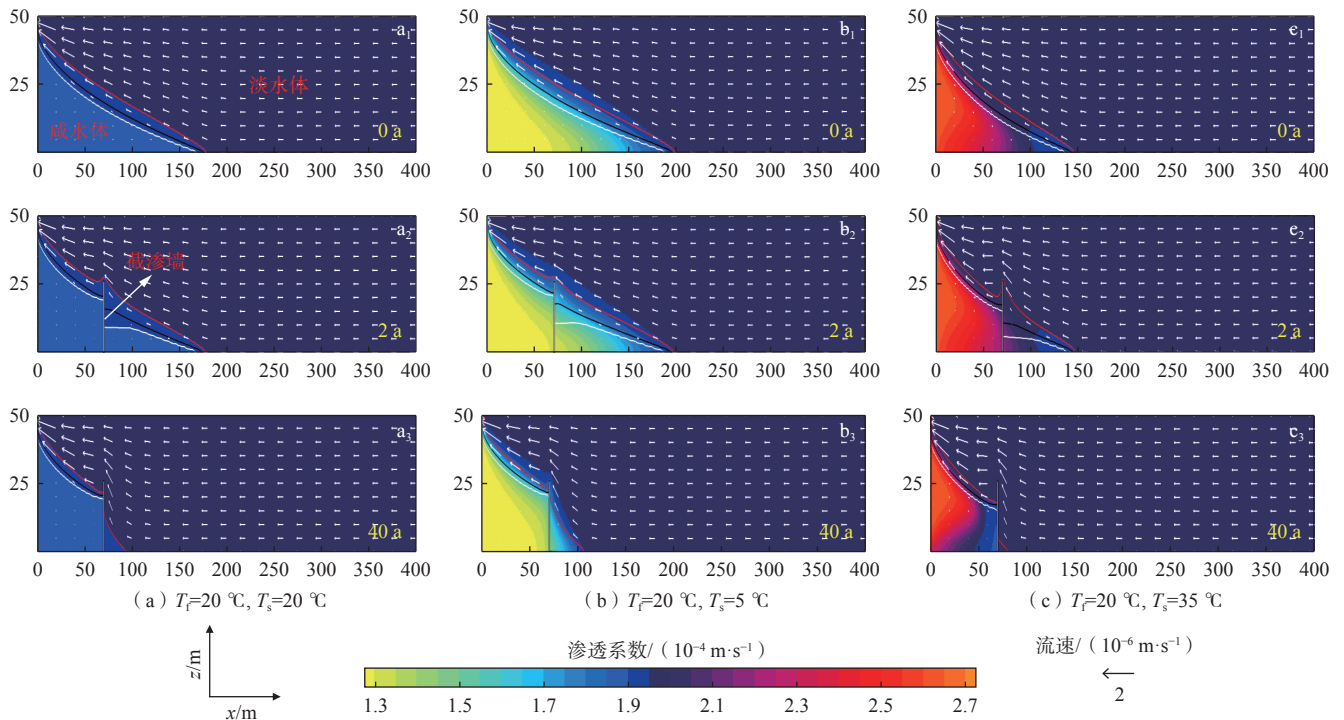


图3 海水温度为 20 °C (a)、5 °C (b) 和 35 °C (c) 时, 在距离海洋边界 70 m 处建造 26 m 高截渗墙后经过 0, 2, 40 a 时的渗透系数分布图

Fig. 3 Distributions of hydraulic conductivity (K) after installation of 26 m-height cut-off wall at 70 m from the sea boundary for 0, 2, and 40 years at seawater temperatures of 20 °C (a), 5 °C (b), and 35 °C (c)

下降, 低浓度混合区的流速更缓慢, 墙后咸水清除的时间增加, 流场达到平衡状态的时间延长。建墙 40 a, 地下水流仍受到小部分高浓度咸水阻拦。35 °C 海水条件下(图 3c), 地下水平均流速上升, 墙后咸水清除

的时间缩短。建墙 40 a, 墙后地下水流已不受咸水的阻拦。

35 °C 海水条件下地下水渗流分布情况如图 4 所示。海水入侵 7 a 时(图 4a₁), 咸水楔长度达到 146.9 m, 且逐

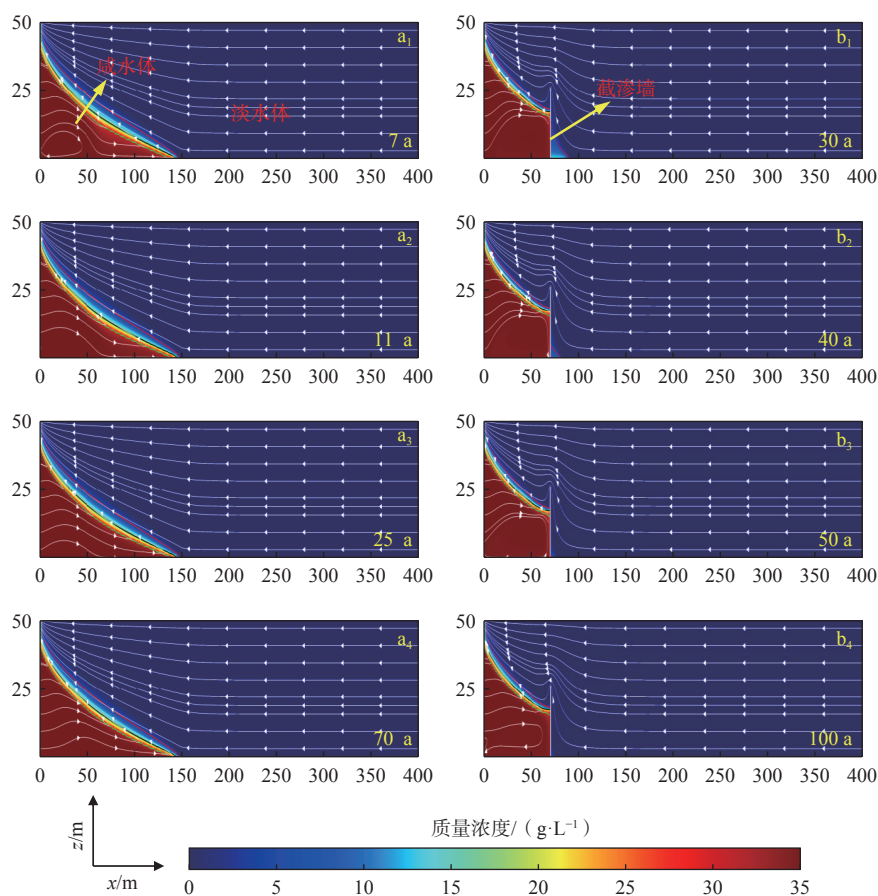


图 4 35 °C 海水条件下, 咸水楔稳定后地下水渗流分布的动态变化 (a) 以及在第一应力期 50 a 时建墙后浓度和流场的动态变化 (b)
Fig. 4 Characteristics of groundwater seepage and saltwater wedge before the installation of the wall (a) and after the wall was installed at 50 years during the initial stress period (b) at seawater temperatures of 35 °C

渐稳定。而海水入侵 70 a 时, 咸水楔长度为 145.9 m, 相较 7 a 时略有回缩。这种咸水楔长度的多段变化主要是由热量与盐分的双重扩散与海水密度变化导致的咸水区内流场的变化引起的。海水入侵 7 a 时, 咸水区内产生了反向环流(图 4a₁), 与 Pu 等研究结果一致^[25]。特别在海水高过地下水 15 °C 的情况下, 咸水楔中部的高温海水在流动中受到温差的影响, 温度下降而密度增加, 流体路径发生了改变, 这部分“更重”的海水向下方流动, 然后沿环状路径汇入海洋, 形成了路径更短的咸水反向循环。这种咸水区内反方向短路径的咸水循环增加了海水边界的总排海通量(即固定淡水排泄量和循环海水排泄量之和), 而随着时间的增加, 反向环流渐渐消失, 11 a 时, 反向环流几乎完全消失, 转变为上升流(图 4a₂); 之后, 咸水区内的流场不断调整, 上升流的弧度变缓, 排泄路径也缓慢缩短(图 4a₄)。

35 °C 海水条件下, 截渗墙 ($H_d=26$ m, $L_d=70$ m) 建成后含水层流场变化如图 4 所示。地下水流场在截

渗墙附近发生改变, 截渗墙后残留咸水随着地下水流逐步从截渗墙顶部排出。建墙 30 a 后仅在截渗墙后的底部区域存在少量咸水(图 4b₁), 建墙 40 a 后残留咸水基本清除(图 4b₂)。另外, 截渗墙前咸水区内部的地下水流场发生明显变化, 建墙 50 a 后咸水区内产生新的反向环流(图 4b₃), 建墙 100 a 后环流更加明显(图 4b₄)。

为了进一步探讨海水温度对地下水排海通量的影响, 绘制了地下水温度为 25 °C, 海水温度分别为 5, 15, 25, 35 °C 条件下 Q' 随时间的变化曲线。如图 5(a) 所示, 墙体安装前(0 a), 海水温度分别为 5, 15, 25, 35 °C 条件下, Q_0 分别为 3.58×10^{-5} , 3.79×10^{-5} , 3.99×10^{-5} , 4.14×10^{-5} m³/s。高温海水显著增加了地下水排海通量。

墙体建成后, Q 开始下降, 4 种温度条件下的 Q' 均在 2.5 a 左右达到最低值 96.0%, 之后逐渐上升, Q' 分别在 78, 66, 55, 36 a 达到稳定, 数值分别为 104.2%、103.1%、101.3% 和 99.7%(图 5b)。平衡状态下的 Q' 反映了修建墙体前咸水楔对地下水流场的阻碍程度。

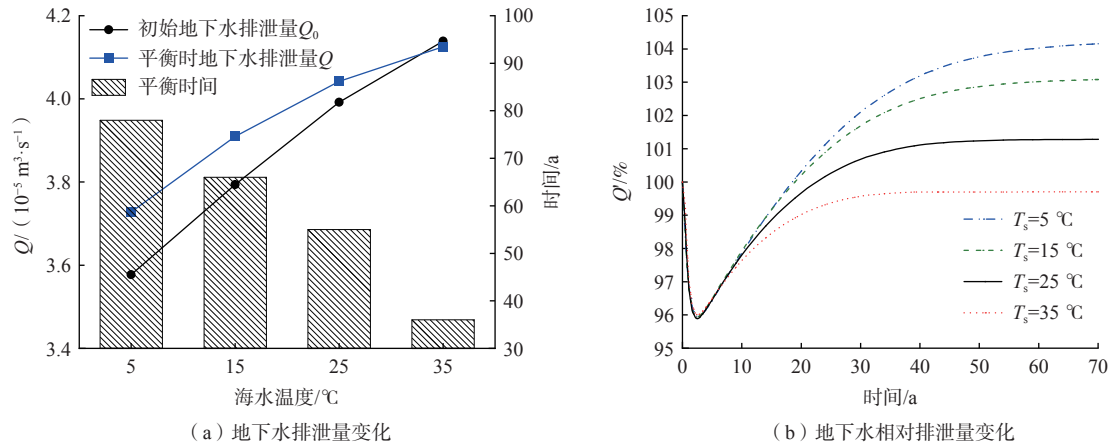


图 5 不同海水温度条件下地下水排泄量 (a) 与相对排泄量 (b) 的变化
Fig. 5 Groundwater discharge flux (a) and percentage of groundwater discharge flux (b) with different seawater temperatures (T_s)

随着海水温度的升高, 地下水排泄平衡时间显著缩短, 但平衡状态下的 Q 则逐渐减小。表明低温条件下咸水楔对地下水渗流的阻碍作用大于截渗墙, 高温条件下截渗墙对地下水渗流的阻碍作用更大。

2.3 不同地下水温度条件下地下水流场的动态变化特征

不同地下水温度条件下, 截渗墙 ($H_d=26 \text{ m}$, $L_d=70 \text{ m}$) 建成后含水层渗透系数随时间变化如图 6 所示。常

温地下水条件下(图 6a), 含水层渗透系数在 $1.7 \times 10^{-4} \sim 1.9 \times 10^{-4} \text{ m/s}$; 5 $^{\circ}\text{C}$ 地下水条件下(图 6b), 由于地下水温度较低, 含水层渗透系数明显下降, 墙后含水层渗透系数下降至 $1.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 建墙 40 a 墙后受高浓度咸水阻拦的区域也较常温有所增大。35 $^{\circ}\text{C}$ 地下水条件下(图 6c), 墙后地下水平均流速上升, 咸水清除的时间缩短。建墙 40 a, 墙后地下水流仍部分受到咸水体阻拦。

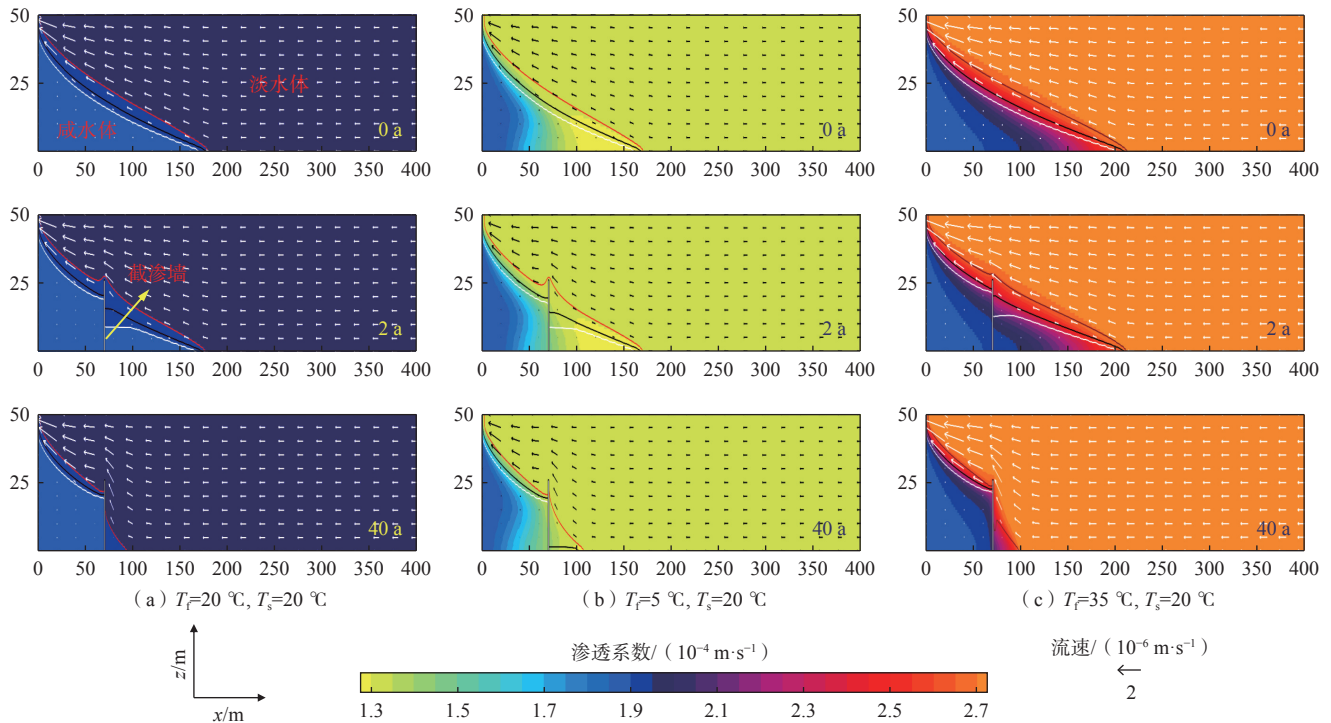


图 6 地下水温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ (a)、5 $^{\circ}\text{C}$ (b) 和 35 $^{\circ}\text{C}$ (c) 时, 在距离海洋边界 70 m 处建造 26 m 高截渗墙后经过 0, 2, 40 a 时的渗透系数分布图

Fig. 6 Distributions of hydraulic conductivity (K_d) after installation of 26 m-height cut-off wall at 70 m from the sea boundary for 0, 2, and 40 years at freshwater temperatures of 20 $^{\circ}\text{C}$ (a), 5 $^{\circ}\text{C}$ (b), and 35 $^{\circ}\text{C}$ (c)

不同地下水温度条件下,地下水渗流分布条件如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,常温地下水条件下咸水楔长度约为 169.2 m,地下水渗流方向受到了咸水楔的影响,改变了方向。低温地下水条件下,咸水楔长度缩短至 153.1 m 左右,且在咸水楔内产生了“上升流”现象(图 7b)。高温地下水($T_f=35\text{ }^{\circ}\text{C}$)条件下,咸水楔长度增长至 216.0 m 左右,流场形状较等温条件无

明显变化(图 7c)。在截渗墙建成后,墙后残留咸水净化时间约为 51 a(图 7d); $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 地下水条件下,由于含水层温度较低,低浓度混合区的流速缓慢,墙后咸水清除的时间增加,墙后残留咸水净化的时间延长至 74 a(图 7e)。 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 地下水条件下,虽然含水层渗透系数有所增加,但由于建墙前咸水楔长度较常温有所增加,墙后残留咸水净化的时间长于常温条件(图 7f)。

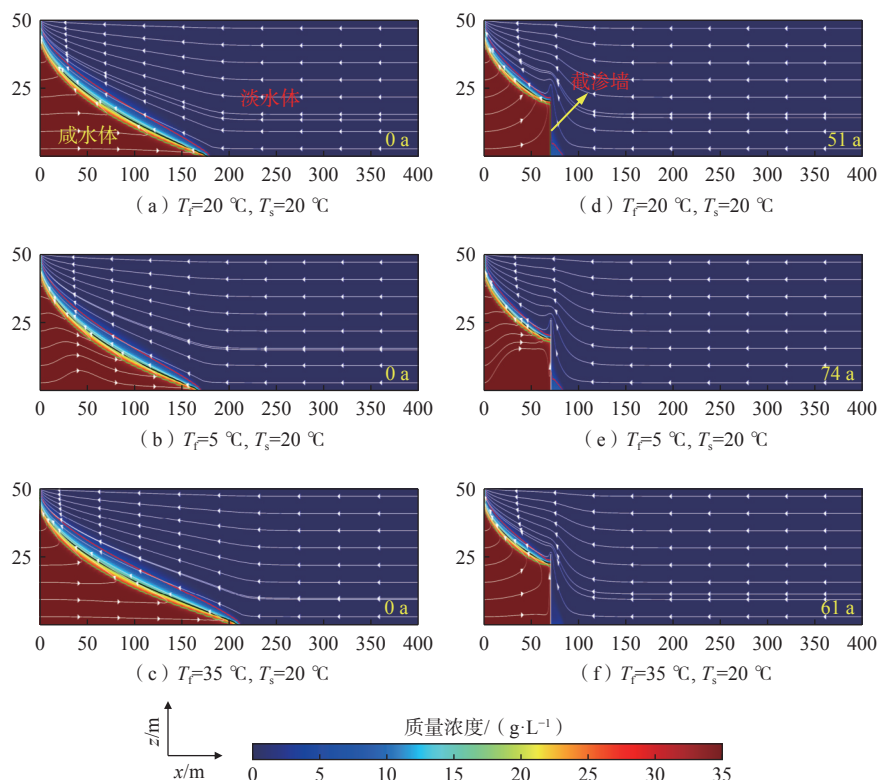


图 7 不同地下水温度下初始状态时的地下水浓度和流场分布 (a—c) 以及相对排泄量达到平衡时的地下水浓度和流场分布 (d—f)
Fig. 7 Distributions of salinity and flow field at the initial state (a—c) and the state when the relative groundwater discharge flux reaches equilibrium (d—f) under different groundwater temperatures

为了进一步探讨地下水温度对地下水排海通量的影响,记录了海水温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、地下水温度分别为 5, 15, 25, $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 Q' 随时间的变化曲线(图 8)。如图 8 所示,4 种温度条件下的 Q' 分别在 3.1, 3.1, 2.5, 2.1 a 左右达到最低值 96.7%、95.8%、95.9% 和 96.0%,之后逐渐上升, Q' 分别在 102, 59, 55, 55 a 达到稳定,数值分别为 104.3%、100.3%、101.3% 和 103.6%,4 组 Q' 均超过了 100%。随着含水层温度的下降,地下水渗流排泄平衡时间显著增加,而平衡状态下的 Q' 则逐渐减小。地下水温度高于海水温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,较大面积的咸水楔对地下水流动的影响大于墙体本身,残留咸水的去除速率更快,平衡时间较短。而当地下水温度低于海水温度 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,较小面积的咸水楔对地下水渗

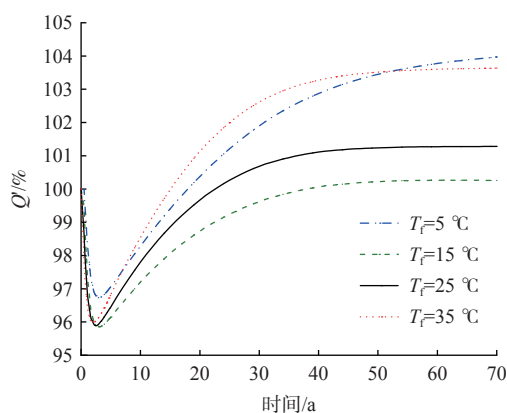


图 8 不同地下水温度条件下相对排泄量 (Q') 的变化
Fig. 8 Relative groundwater discharge flux (Q') with different freshwater temperatures (T_f)

流的阻碍作用小于墙体, 且由于残留咸水清除时间较长, 平衡时间大幅延长, 此时海水与地下水温度差过大导致墙前咸水区内咸水的路径改变。而当地下水温度低于海水温度 20°C 时, 咸水区内的反向环流增加了地下水排海通量, 使得 Q' 异常增高。

2.4 咸淡水温度的综合影响

墙体修建前的 $Q_0(0\text{ a})$ 如图 9(a) 所示, Q_0 随着地下水温度的升高而显著增加, 海水温度的变化对 Q_0 影响较小。不同温度组合之间 Q_0 的最大差距达到 $2.60 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。需要注意的是, 当海水温度超过 20°C 且咸淡水温差大于 0°C 且小于等于 10°C 时 ($\Delta T = T_s - T_f$, $0^{\circ}\text{C} < \Delta T \leq 10^{\circ}\text{C}$), 海水入侵阶段, 咸水区会产生上升

流, 咸水区内地下水的流动路径变长; 当海水温度超过 20°C 且咸淡水温差大于 10°C 且小于 20°C 时 ($\Delta T = T_s - T_f$, $10^{\circ}\text{C} < \Delta T < 20^{\circ}\text{C}$), 海水入侵阶段, 咸水区内的流场变化更为复杂, 如图 10(a) 所示, 当地下水为 20°C , 海水为 35°C 时, 随着流场内“产生反向环流-上升流-上升流逐渐消失”的变化, Q_0 呈现先上升后下降, 再上升的趋势。而当海水温度超过 20°C 且咸淡水温差大于等于 20°C 时 ($\Delta T = T_s - T_f \geq 20^{\circ}\text{C}$), 咸水区内的形成的反向环流变得很难消失, 100 a 后仍然存在, 由于受到咸水楔内快速循环的影响, 地下水排泄总量增加。

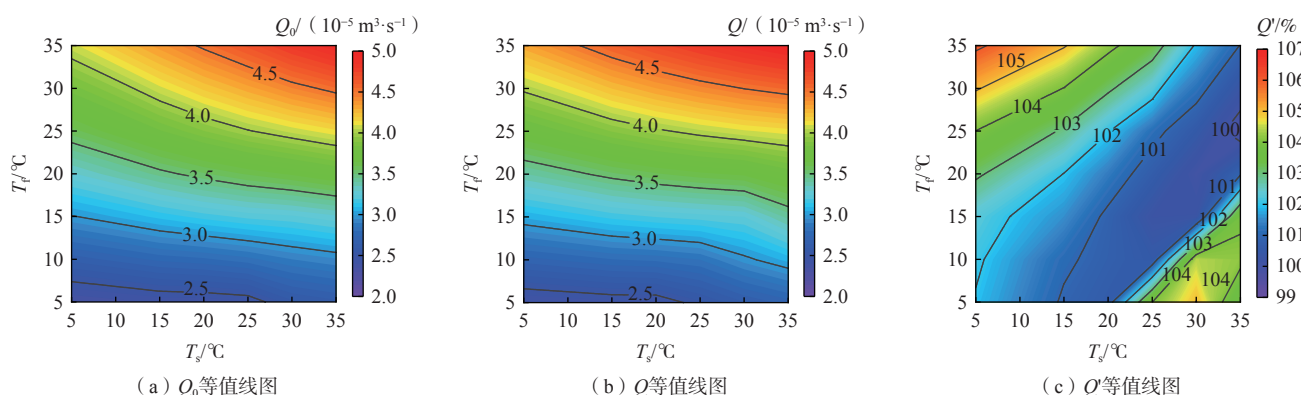


图 9 不同咸淡水温度组合条件下, 第一应力期结束后的地下水排泄量 (a)、建墙后的地下水排海通量 (b) 和相对排泄量 (c) 的等值线图

Fig. 9 Isopleth maps of groundwater discharge after the end of the first transient stress period (a), groundwater discharge flux (b) and relative groundwater discharge flux (c) after wall construction with different temperature combinations

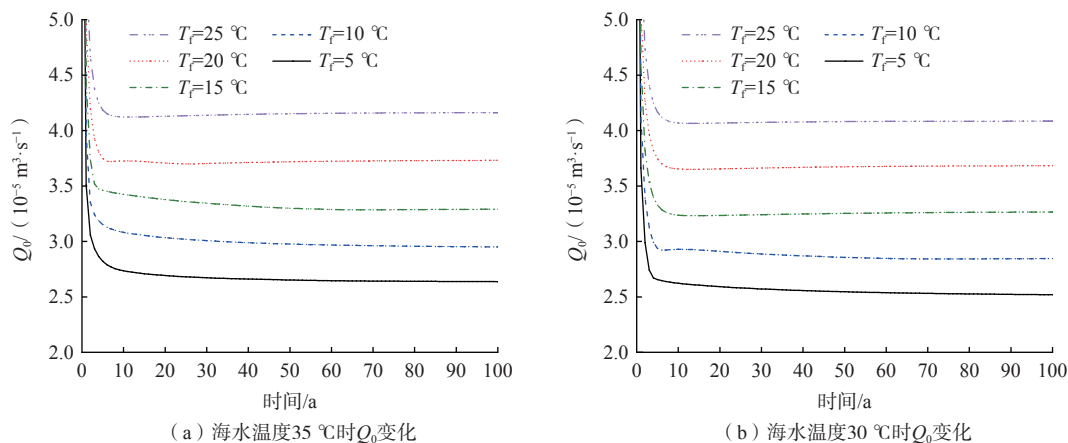


图 10 海水温度为 35°C (a) 和 30°C (b) 时, 不同地下水温度条件下海水入侵阶段地下水排泄量 (Q_0) 的变化

Fig. 10 Initial groundwater discharge flux (Q_0) when the seawater temperature (T_s) is 35°C (a) and 30°C (b), with different groundwater temperatures (T_f) at seawater intrusion stage

地下水流场达到平衡时的地下水排泄通量 (Q) 以及相对排泄量 (Q') 如图 9(b)(c) 所示。对于大多数温

度组合, 咸水楔对地下水流动的阻碍作用比截渗墙墙体本身更强, 使 Q' 大于 100%。当地下水与海水温差

超过 15 °C 时, 温度越高, 咸水区内的反向环流越容易产生与维持, 咸水区的地下水循环越快, 地下水排海总量增加。

3 结论及展望

(1) 截渗墙建成后, 咸-淡水的平衡状态被打破, 地下水排泄通量呈现先减少后增加的趋势。随着海水温度的升高, 达到渗流排泄平衡所需的时间显著缩短, 平衡状态下的 Q 逐渐减小。

(2) 地下水温度为 25 °C, 海水温度分别为 5, 15, 25, 35 °C 条件下, Q 分别在 78, 66, 55, 36 a 达到稳定, 数值分别为 104.2%、103.1%、101.3% 和 99.7%, 表明在低温海水情况下咸水楔对地下水渗流的阻碍作用大于墙体本身。相反, 在高温海水条件下, 截渗墙的阻碍效果更为显著。

(3) 随着地下水温度的下降, 达到渗流排泄平衡所需的时间显著增加, 平衡状态下的 Q 逐渐减小。在 35 °C 地下水条件下, 咸水楔对地下水流动的影响大于墙体本身, 残留咸水的去除速率更快, 达到平衡的时间较短。而当淡水与海水温差超过 15 °C 时, 咸水区内的反向环流更容易产生与维持, 加快了咸水区地下水的循环, 导致地下水排海总量增加。

本研究基于均质各向同性潜水含水层的假设进行, 未考虑天然含水介质的非均质性, 以及潮汐波动和上部咸水羽流 (upper saltwater plume, USP) 对海底地下水排泄的潜在影响。另外, 实际情况上海水温度的变化更为复杂, 受季节性波动、地理位置、水力梯度、天气事件以及全球气候变化等多重因素的影响。在今后的研究中, 应进一步考虑潮汐和非均质各向异性等因素, 使模型更贴近实际含水层的热动力学特性, 以更准确地模拟热效应下的残留咸水回退过程。

参考文献 (References) :

- [1] ALLOW K A. The use of injection wells and a subsurface barrier in the prevention of seawater intrusion: A modelling approach[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2012, 5(5): 1151 – 1161.
- [2] THOMAS B F, FAMIGLIETTI J S. Identifying climate-induced groundwater depletion in GRACE observations[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4124.
- [3] KETABCHI H, MAHMOODZADEH D, ATAIE-ASHTIANI B, et al. Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 235 – 255.
- [4] MELET A, MEYSSIGNAC B, ALMAR R, et al. Under-estimated wave contribution to coastal sea-level rise[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(3): 234 – 239.
- [5] LUYUN R, MOMII K, NAKAGAWA K. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(3/4): 227 – 236.
- [6] ISHIDA S, KOTOKU M, ABE E, et al. Construction of subsurface dams and their impact on the environment[J]. *RMZ/Materials and Geoenvironment*, 2003(1): 50.
- [7] KIM J T, CHOO C O, KIM M I, et al. Validity evaluation of a groundwater dam in Oshipcheon River, eastern Korea using a SWAT-MODFLOW model[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(22): 769.
- [8] SUN Qiguo, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Effectiveness and comparison of physical barriers on seawater intrusion and nitrate accumulation in upstream aquifers[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2021, 243: 103913.
- [9] ISHIDA S, TSUCHIHARA T, YOSHIMOTO S, et al. Sustainable use of groundwater with underground dams[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2011, 45(1): 51 – 61.
- [10] NAWA N, MIYAZAKI K. The analysis of saltwater intrusion through Komesu underground dam and water quality management for salinity[J]. *Paddy and Water Environment*, 2009, 7(2): 71 – 82.
- [11] SENTHILKUMAR M, ELANGO L. Modelling the impact of a subsurface barrier on groundwater flow in the lower Palar River basin, southern India[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19(4): 917 – 928.
- [12] 邢万里, 陈小刚, 杜金洲. 基于镭同位素示踪的嵊泗高场湾海底地下水排放 [J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(6): 817 – 824. [XING Wanli, CHEN Xiaogang, DU Jinzhou. Using radium isotopes to estimate SGD flux in Gaochang bay, Shengsi[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(6): 817 – 824. (in Chinese with English abstract)]
- [13] MOORE W S. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2(1): 59 – 88.
- [14] 张成成. 镭同位素评估辽东湾海底地下水排泄及其携带营养盐通量 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [ZHANG Chengcheng. Estimating submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes into Liaodong Bay using radium isotopes[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [15] WANG Xuejing, LI Hailong, JIAO Jiu Jimmy, et al.

- Submarine fresh groundwater discharge into Laizhou Bay comparable to the Yellow River flux[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8814.
- [16] CHANG Qinpeng, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater discharge[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 508 – 519.
- [17] ZHANG Jiaxu, LU Chunhui, SHEN Chengji, et al. Flow and transport in coastal aquifer-aquitard systems: Experimental and numerical analysis[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(4): e2023WR035200.
- [18] ZHANG Jiaxu, LU Chunhui, ZHANG Chenming. Dense contaminants mixing into the saltwater wedge in coastal aquifers: Laboratory and numerical investigations[J]. *Water Resources Research*, 2024, 60(7): e2024WR037452.
- [19] CANTALICE JOS EACUTE R B, VICTOR C P, VIJAY P S, et al. Hydrology and water quality of a underground dam in a semiarid watershed[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2016, 11(28): 2508 – 2518.
- [20] CHANG Qinpeng, ZHENG Tianyuan, CHEN Youyuan, et al. Investigation of the elevation of saltwater wedge due to subsurface dams[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(22): 4251 – 4261.
- [21] BENZ S A, BAYER P, BLUM P. Global patterns of shallow groundwater temperatures[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(3): 034005.
- [22] NGUYEN T T M, YU Xiayang, PU Li, et al. Effects of temperature on tidally influenced coastal unconfined aquifers[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(4): e2019WR026660.
- [23] LOCARNINI M M, MISHONOV A V, BARANOVA O K, et al. World Ocean Atlas 2018, Volume 1: Temperature[M]. [S.l.]: NOAA Atlas NESDIS 81, 2018: 52.
- [24] OUDE ESSINK G H P. Improving fresh groundwater supply—Problems and solutions[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2001, 44(5/6): 429 – 449.
- [25] PU Li, XIN Pei, NGUYEN T T M, et al. Thermal effects on flow and salinity distributions in coastal confined aquifers[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2020WR027582.
- [26] 杨辉瑜, 郑西来, 郑天元, 等. 海水入侵含水层的非等温过程数值模拟研究[J]. *工程勘察*, 2022, 50(12): 39 – 46. [YANG Huiyu, ZHENG Xilai, ZHENG Tianyuan, et al. Numerical simulation of nonisothermal process of seawater intrusion in coastal aquifer[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2022, 50(12): 39 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [27] JAMSHIDZADEH Z, TSAI F T C, AHMAD MIRBAGHERI S, et al. Fluid dispersion effects on density-driven thermohaline flow and transport in porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 61: 12 – 28.
- [28] 高明鹏, 郑西来, 郑天元, 等. 截渗墙作用下滨海地下水渗流与排泄特征[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(4): 111 – 119. [GAO Mingpeng, ZHENG Xilai, ZHENG Tianyuan, et al. Seepage and discharge characteristics of coastal groundwater under the action of the cutoff wall[J]. *Periodical of Ocean University of China(Science & Technology Edition)*, 2022, 52(4): 111 – 119. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华



郑天元, 中国海洋大学环境科学与工程学院教授, 博士生导师, 国家优秀青年科学基金获得者, 山东省“泰山学者”青年专家, 山东省高等学校青年创新团队带头人。现任美国地球物理学会(AGU)地下水专业委员会委员, *Journal of Hydrology* 副主编, 国际水文科学协会中国地下水分会委员会委员。

长期致力于滨海水文地质的前沿科学问题研究, 开发了知名多场耦合多相流数值模拟软件 OpenGeoSys 的多个渗流计算模块, 提出了积分模型耦合全尺寸模型的高效多相流模拟算法, 拓展了滨海地下水源地硝酸盐污染的解析方法, 揭示了海水入侵防控的水盐动力机理和咸水净化周期, 阐明了滨海地下水氮素迁移-转化新机制。主持国家自然科学基金青年项目、面上项目和中国海洋大学优秀青年科技人才培养项目, 2024 年获批国家自然科学基金优秀青年科学基金项目, 作为学术骨干参加国家自然科学基金重点项目和基金委-山东省联合基金重点项目。以第一/通讯作者在 *Water Resources Research*、*Water Research*、*Advances in Water Resources*、*Journal of Hydrology* 等期刊发表 SCI 论文 30 余篇, 授权国家发明专利 5 项、软件著作权 7 项, 参与出版英文专著 2 部, 负责再版全国统编教材《地下水污染控制》。获 2021 年山东省科学技术进步二等奖(3/9)、2022 年山东省海洋科技创新二等奖(1/7)、2023 年齐鲁水利科学技术一等奖(1/9)。受邀担任国际水文地质大会、国际计算水资源大会等重要国际会议专题召集人。

长期致力于滨海水文地质的前沿科学问题研究, 开发了知名多场耦合多相流数值模拟软件 OpenGeoSys 的多个渗流计算模块, 提出了积分模型耦合全尺寸模型的高效多相流模拟算法, 拓展了滨海地下水源地硝酸盐污染的解析方法, 揭示了海水入侵防控的水盐动力机理和咸水净化周期, 阐明了滨海地下水氮素迁移-转化新机制。主持国家自然科学基金青年项目、面上项目和中国海洋大学优秀青年科技人才培养项目, 2024 年获批国家自然科学基金优秀青年科学基金项目, 作为学术骨干参加国家自然科学基金重点项目和基金委-山东省联合基金重点项目。以第一/通讯作者在 *Water Resources Research*、*Water Research*、*Advances in Water Resources*、*Journal of Hydrology* 等期刊发表 SCI 论文 30 余篇, 授权国家发明专利 5 项、软件著作权 7 项, 参与出版英文专著 2 部, 负责再版全国统编教材《地下水污染控制》。获 2021 年山东省科学技术进步二等奖(3/9)、2022 年山东省海洋科技创新二等奖(1/7)、2023 年齐鲁水利科学技术一等奖(1/9)。受邀担任国际水文地质大会、国际计算水资源大会等重要国际会议专题召集人。