

基于盐度动态模拟估算潮间带地下淡水排泄量

王志秀, 李亚松, 郝奇琛, 张媛静, 肖 勇, 刘春雷

Submarine fresh groundwater discharge estimation in the intertidal zone based on dynamic salinity simulation

WANG Zhixiu, LI Yasong, HAO Qichen, ZHANG Yuanjing, XIAO Yong, and LIU Chunlei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308057>

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

典型内陆湖区地下水数值模拟及其主控因子识别

Controlling factors identification of groundwater system evolution based on numerical simulation in the typical arid-inland basin

于晓露, 宋健, 林锦, 吴剑锋, 吴吉春 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 24-33

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

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

基于FEFLOW的三维土壤-地下水耦合铬污染数值模拟研究

Numerical simulation of three-dimensional soil-groundwater coupled chromium contamination based on FEFLOW

刘玲, 陈坚, 牛浩博, 李璐, 殷乐宜, 魏亚强 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 164-174

“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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202308057

王志秀, 李亚松, 郝奇琛, 等. 基于盐度动态模拟估算潮间带地下淡水排泄量 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 56-67.

WANG Zhixiu, LI Yasong, HAO Qichen, et al. Submarine fresh groundwater discharge estimation in the intertidal zone based on dynamic salinity simulation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 56-67.

基于盐度动态模拟估算潮间带地下淡水排泄量

王志秀^{1,2,3}, 李亚松^{1,2}, 郝奇琛^{1,2}, 张媛静^{1,2}, 肖 勇⁴, 刘春雷^{1,2}

(1. 福建省水循环与生态地质过程重点实验室, 福建 厦门 361021; 2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 3. 河北地质大学城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031; 4. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 目前关于砂质潮间带海底地下淡水排泄速率、海水再循环速率及相应比例随潮位的变化研究较少。文章以厦门湾某砂质潮滩为例, 对地下水渗出面的盐度进行实地动态监测, 采用变密度流数值模拟技术, 对潮间带地下水盐度变化过程进行动态模拟, 以此反演潮间带海底地下淡水排泄量。研究结果显示: (1) 潮间带不同位置地下水盐度随潮汐发生不同规律的变化, 通过数值模型估算出典型剖面海底地下水排泄量为 $17.47 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 其中海底地下淡水排泄量为 $3.19 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 占海底地下水排泄总量的 18.26%, 海水再循环量为 $14.28 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 占海底地下水排泄总量的 81.74%, 处于主导地位; (2) 潮汐作用下, 海水入渗与海底地下水排泄交替发生, 落潮阶段发生交替的时间略早于平潮位, 涨潮阶段发生交替的时间略晚于平潮位, 海水入渗速率与海底地下水排泄速率达到峰值时刻分别早于潮位达到高潮和低潮时刻, 整个潮汐周期内(从高潮时刻到下一个高潮时刻)海底地下淡水排泄量比例逐渐增大; (3) 潮间带地下水盐度的变化可间接反映海底地下淡水排泄量的变化, 与其他研究相比, 该典型剖面的海底地下淡水排泄量占海底地下水排泄总量比例相对较高, 显示潮间带存在着大量海底地下淡水排泄; (4) 通过敏感性分析可知, 内陆水头对海底地下淡水排泄量及盐度空间分布有重要影响。研究可为海岸带地下水开发利用和滨海环境管理提供一定参考。

关键词: 海岸带; 海底地下淡水排泄; 数值模拟; 地下水盐度; 砂质海岸; 渗出面

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0056-12

Submarine fresh groundwater discharge estimation in the intertidal zone based on dynamic salinity simulation

WANG Zhixiu^{1,2,3}, LI Yasong^{1,2}, HAO Qichen^{1,2}, ZHANG Yuanjing^{1,2}, XIAO Yong⁴, LIU Chunlei^{1,2}

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Water Cycling and Eco-Geological Processes, Xiamen, Fujian 361021, China; 2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. College of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 4. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2023-10-14

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1301301); 厦门自然科学基金项目(3502Z202373152); 福建省水循环与生态地质过程重点实验室开放基金项目(SK202305KF01); 水环所基本科研业务费项目(SK202305); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190303; DD20230459)

第一作者: 王志秀(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: 2215866565@qq.com

通讯作者: 郝奇琛(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事水文地质方面研究。E-mail: haoqichen_iheg@163.com

Abstract: Currently, limited studies focused on the variations in submarine fresh groundwater discharge rates, seawater recirculation rates, and their respective proportions with tidal level change in sandy intertidal zones. This study conducted in-situ dynamic monitoring of the salinity at the groundwater seepage face in a sandy tidal flat in Xiamen Bay. Using variable-density flow numerical model, the dynamic groundwater salinity in the intertidal zone was simulated to calculate the submarine fresh groundwater discharge in the intertidal zone. The results show that groundwater salinity at different locations in the intertidal zone exhibits varying patterns with the tides. The submarine groundwater discharge at a typical profile was estimated to be $17.47 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$, in which the submarine fresh groundwater discharge was calculated to be $3.19 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$, accounting for 18.26% of the total submarine groundwater discharge. In contrast, recirculated submarine groundwater discharge was estimated to be $14.28 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$, constituting 81.74% of the total submarine groundwater discharge and thus playing a dominant role. Under the influence of tides, seawater infiltration and submarine groundwater discharge are alternate. The alternation during ebb tide occurs slightly earlier than the slack water level, while during flood tide, it occurs slightly later. The peak moment of seawater infiltration rate and submarine groundwater discharge rate precede the tidal peaks at high and low tides, respectively. Throughout the tidal cycle (from high tide to the next high tide), the proportion of submarine fresh groundwater discharge gradually increases. The variation in groundwater salinity in the intertidal zone can represent the changes in submarine fresh groundwater discharge. The proportion of submarine fresh groundwater discharge in the total submarine groundwater discharge is relatively high in this typical profile than that in the previous studies. It indicates the presence of a substantial amount of submarine fresh groundwater discharge in the intertidal zone. Through sensitivity analysis, it reveals that inland hydraulic head has significant influences on submarine fresh groundwater discharge and spatial distribution of salinity. This study can provide scientific information for the development and utilization of coastal groundwater and the management of coastal environments.

Keywords: coastal zone; submarine fresh groundwater discharge; numerical simulation; groundwater salinity; sandy coastal; seepage face

海底地下水排泄(submarine groundwater discharge, SGD)是影响海洋生态环境的“双刃剑”。作为全球水循环的重要组成部分,SGD既是海洋中水和各种化学物质的重要来源之一,同时也是各种污染物从陆地向海洋输送的一个重要而隐蔽的通道^[1-3]。SGD分为海底地下淡水排泄(submarine fresh groundwater discharge, SFGD)和再循环海水排泄(recirculated submarine groundwater discharge, RSGD)^[1],其主要受内陆和海洋双重驱动力的共同作用。内陆地下水水力梯度是SFGD的直接驱动力,当内陆地下水水位高于海水水位时,在内陆地下水水力梯度驱动下向海洋方向运移^[4-5],降雨、蒸发和人工开采都会影响内陆地下水水位,进而影响海底地下淡水排泄;而RSGD的驱动力比较复杂,主要有潮汐、咸淡水密度差等复杂的海洋作用^[5]。

在海底地下水排泄过程中,SFGD占总SGD通量比例一般很小(通常小于10%)^[6-7]。有研究显示,尽管全球海底地下淡水排泄量仅占总淡水输入量的0.6%,但它在沿海生态系统中发挥着重要作用^[8]。RSGD对

近岸海域净水量贡献不大,但对物质循环有重要作用^[9]。我国近岸海域约80%的污染物来自陆地,而物质从陆地到海洋的运输途径主要是地表径流和海底地下水排泄。有研究表明:全球尺度上SGD通量比河流入海量高3~4倍^[10],在已有的研究中,有超过48%的案例SGD携带营养盐通量超过了当地河流输入量;超过90%的案例SGD营养盐通量超过当地河流的10%^[11]。由此看出,SGD是陆源物质向海洋排泄的一个重要的不可忽视的途径。因此,研究其排泄通道及排泄量对于识别人类活动对海岸带生态环境的影响至关重要。

目前,国内外研究和计算SGD的方法主要有3种:直接测量法、环境同位素示踪法、水文模型法^[2]。其中,水文模型法包括水盐均衡法、数值模拟法以及解析法等。随着科技的进步和发展,近年来也有学者利用遥感法(卫星热成像)^[12-13]、电阻率法(层析成像法)^[14]、温度示踪法^[15-16]等方法进行SGD的研究。已有研究表明,数值模拟方法已成为地下水和生态研究中最常用的方法^[17],与其他方法相比,它具有灵活、适

应性强、善于模拟复杂的水文地质条件、解决复杂的地下水定量计算问题等优点。潮间带是海陆交替的过渡地带,同时也是物质和能量交换复杂和强烈的地带,该地带的海底地下水排泄及其盐度分布受内陆水头、潮汐共同影响。在密度梯度的驱动下,海水侵入含水层,形成咸水楔形,由于潮汐周期性的浸没形成倒挂于潮间带地表下方的上盐晕(upper saline plume, USP)^[18-20]。本文研究区位于厦门岛南岸砂质潮间带,为了更好地模拟潮间带复杂的地下水流场和盐分运移场,揭示潮间带地下水盐度运移机理,选用数值模拟的方法计算海水-地下水各交换量。

目前,已有的研究较少考虑海底地下水排泄中 SFGD、RSGD 速率及相应比例随潮位的变化情况,同时也较少精细划分海水入渗量中的潮汐作用下上边界入渗量与密度作用下的侧向入渗量。掌握各分量的变化规律并划分各分量比重,对于揭示潮间带水循环机理具有重要意义,对后期进一步探究 SGD 的环境效应提供一定的参考依据。因此,本文重点考虑了海水-地下水各交换分量及比例的变化情况,同时在模型构建过程中提出一种新的海潮边界(变边界条件)的设置方法,解决上边界的频繁转换问题,提高了运行效率。上述研究成果对海岸带地下水开发利用和滨海生态保护具有重要意义。

1 研究区概况

厦门湾位于台湾海峡西岸,九龙江入海口,三面环海,海岸线长度超百余公里,独特的地理位置使得

地下水-海水交替频繁,水力联系密切。研究区属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,雨量丰富。夏季高温多雨,冬季温和少雨,年均气温为 20.9℃,多年平均降水量约为 1 530 mm,其中 3—9 月的降水量占全年降水量的 80% 以上。厦门湾海域的潮汐属正规半日潮,平均潮差为 3.99 m,平均涨潮时间为 378 min,平均落潮时间为 367 min^[21]。研究区地形平缓,上覆中粗砂,渗透性较好,平缓的坡度及砂质潮滩的高渗透性为潮间带海底地下水排泄提供了有利条件。

在厦门岛南岸砂质潮间带选取垂直于海岸线的典型剖面,剖面全长 120 m,剖面设置 4 个监测点,监测点由内陆向海(由北西南东)依次为 H08-1—H08-4,见图 1。本文所用数据为 2022 年 7 月 30 日 14:30—23:00 期间的潮间带地下水监测数据,观测过程中无降水。

2 材料与方法

2.1 野外观测

2.1.1 观测方法

典型剖面监测点布设及现场盐度监测装置见图 2。利用水质监测仪(Manta)对渗出面 4 个监测点及近岸海水进行同步监测,监测地下水和海水的盐度、温度、电导率、pH 值等指标,每 0.5 h 监测 1 次。采用在潮滩渗出面挖出少量泥沙形成小沙坑并在下部挖出排水沟的方法,使地下饱水带出露汇集沙坑中,并由排水沟流出,保证溢出的地下水始终处于不断更新的状态。每个监测点采取多次监测取平均值的方式,保

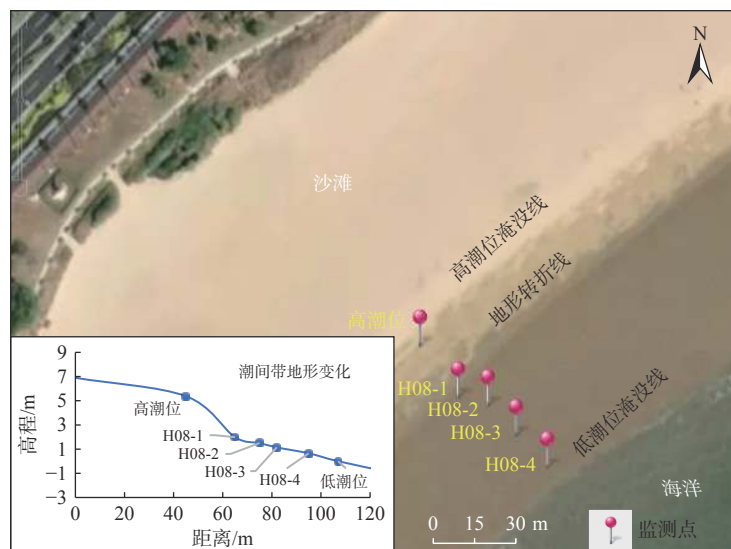


图 1 研究区地理和监测点分布图

Fig. 1 Study area and distribution of monitoring points

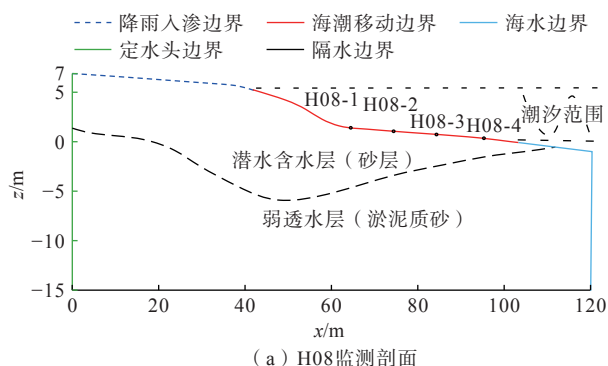


图2 H08 监测剖面 and 野外盐度监测装置图

Fig. 2 Monitoring profile of the H08 and field salinity monitoring device

证溢出点地下水盐度数据的准确性。此外,考虑到潮汐是一个呈周期性涨落的过程。在周而复始的潮汐作用下,海水与地下水交界面也发生规律性的周期变化。故本次一个涨落潮的监测数据基本可反映该研究区短期内地下水盐度的周期性变化,可以用于模型拟合校正。

2.1.2 数据分析

监测点地下水、近岸海水盐度及潮位随时间变化情况见图3。观测期内,近岸海水盐度呈现先下降再上升的变化规律。监测点 H08-1 盐度基本处于稳定状态,接近于海水盐度,原因是该溢出点位于海底地下

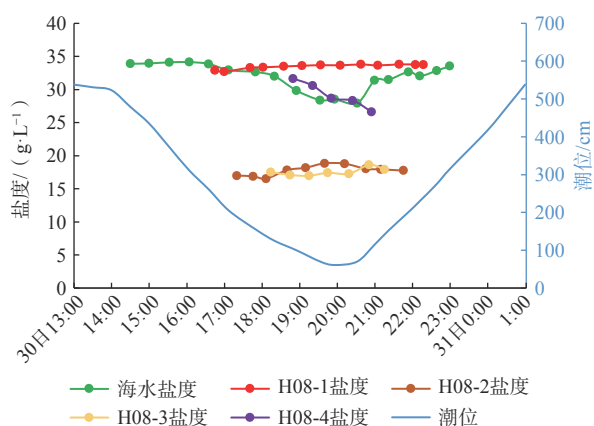


图3 各监测点地下水和海水盐度随潮位的变化

Fig. 3 Variations of salinity in groundwater and seawater with tidal level at each monitoring point

淡水通道上部盐晕附近,当潮位低于该点时,溢出点排出的是涨潮时入渗的海水再次出露地表排泄,即为再循环海水,此区域为 USP 部位,此处与前人研究一致^[1,20,30];监测点 H08-2 和 H08-3 盐度值位于 16~18 g/L 之间,上下波动,原因是 H08-2 和 H08-3 之间是地下淡水主要的排泄通道,导致渗出面地下水盐度较低;监测点 H08-4 靠近海洋方向,从落潮该点出露到再次涨潮淹没仅有 2 h,期间盐度呈现逐渐降低的趋势,原因是靠近海洋方向地下水排泄量较小。

2.2 数值模拟

2.2.1 控制方程

该模型用于模拟内陆地下水水头与海潮变化影响下潮间带地下水盐度空间分布规律,并计算地下淡水排泄量与海水再循环量。本文模拟选用 SEAWAT-2000 软件。SEAWAT-2000 是 MODFLOW-2000 和 MT3D 的耦合,并考虑了密度对地下水流动的影响。尽管 SEAWAT-2000 不能模拟非饱和带的流场变化,但其具有二次湿润的功能,可模拟饱和区的水位波动。SEAWAT 模型已经广泛应用于海水入侵^[22-24]、海底地下水排泄^[25-27]等变密度地下水问题的研究。其中,地下水咸水实测水头与等效淡水水头的关系可表示为:

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} Z \quad (1)$$

式中: h_f ——等效淡水水头/m;

h ——实测水头/m;

ρ ——测量点地下水密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

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

Z ——测量点的高程/m。

地下水水流控制方程可表示为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \rho K_{tx} \left[\frac{\partial h_f}{\partial x} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial Z}{\partial x} \right] \right\} + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \rho K_{ty} \left[\frac{\partial h_f}{\partial y} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial Z}{\partial y} \right] \right\} + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \rho K_{tz} \left[\frac{\partial h_f}{\partial z} + \left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial Z}{\partial z} \right] \right\} = \\ & \rho S_f \frac{\partial h}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q_s \end{aligned} \quad (2)$$

式中: x 、 y 、 z ——与主渗透方向一致的坐标轴;

K_f ——等效淡水渗透系数/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$);

S_f ——等效淡水单位贮水系数/ m^{-1} ;

θ ——多孔介质有效孔隙率;

t ——为时间/h;

q_s ——源(汇)单位体积流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$);

ρ_s ——源(汇)流体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

C ——溶解物质的浓度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ 。

溶质运移方程式表示为:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q C_k^s + R_n \quad (3)$$

式中: C^k —— k 物质的溶解浓度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$;

D_{ij} ——水动力弥散系数/ $(\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1})$;

C_k^s ——源(汇)项中 k 物质的浓度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$;

R_n ——化学反应项。

2.2.2 模型概化

模型概化为长 120 m, 高 22 m 的二维剖面, 将剖面网格剖分为 120 列, 15 层的有限差分模型, 共 1 800 个网格。根据海潮周而复始的涨落规律, 本研究将 1 个实测海潮周期(即 2022 年 7 月 30 日 13:00 至 31 日 01:00)利用类比方法扩展设置多个海潮周期作为模型的应力期, 时间步长为 0.5 h, 模型运行直至盐度分布处于稳定波动的状态。根据搜集已有地质、水文地质资料^[28-29]以及野外实地勘察, 将剖面岩性分为 2 层, 即上部是渗透性较好的中粗砂层, 为潜水含水层; 下部是淤泥质砂层, 为弱透水层, 见图 2(a)。

2.2.3 模型边界

模型边界条件见图 2(a)。左侧边界设置为定水头边界以及零盐分通量边界。根据实测数据将内陆定水头设置为 5.0 m。底部边界为隔水边界与零盐分通量边界, 与外界无水流和溶质的交换。上部边界较为复杂, 分为 3 部分: 0~42 m 为降雨入渗边界, 此处不受海潮的影响, 属于内陆部分; 42~120 m 为受海潮影响的边界, 其中 42~110 m 范围内地表高程介于低潮和高潮之间, 为海潮移动边界(即潮位高于潮滩时为给定水头边界, 采用注水井设置; 潮位低于潮滩时为流量边界, 采用排水沟模块设置), 由盐度数据分析得知, 此处存在渗出面; 110~120 m 范围内地表高程始终低于低潮的水头, 一直被海水淹没, 为海水边界(给定水头边界), 水头为海潮的潮位。海向边界的盐度为 35 g/L 的海水盐度^[30]。

2.2.4 模型参数

本文查阅相关水文地质资料及参考前人的研究^[28-29]确定参数的大致范围, 然后利用试错法进行参数赋值, 运行模型直至盐度空间分布达到相对稳定的波动状态, 最后将稳定状态下的水位、盐度模拟值分别与实测水位、盐度观测值进行拟合。如果拟合结果不理想, 继续调参, 并重复上述操作进行拟合验证, 直至得到较好的拟合结果。根据较好的拟合结果, 最终确立了较为理想的参数, 见表 1。

表 1 含水层水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of aquifer

位置	水平渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	垂向渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	贮水系数/ m^{-1}	给水度	孔隙度	弥散度
第一层	1.25	0.625	0.000 5	0.2	0.3	0.5
第二层	0.08	0.008	0.000 5	0.1	0.3	0.5

3 结果

3.1 地下水盐度空间分布及盐度拟合

通过数值模拟得到低潮位、平潮位及高潮位时盐度空间分布及流速图见图 4。均呈现出密度效应产生的下盐晕, 以及潮汐影响下形成的上盐晕。对比 3 个时刻模拟结果可知: 低潮时, 内陆水头高于海水水头, 地下含水层向海洋排泄, 水流向海洋方向流动, 且流速较大; 随着潮位的升高, 平潮时, 整体上水流流速降低, 上盐晕下部出现海水入渗补给地下水, 局部水流向内陆方向流动; 高潮时, 海水等效淡水水头高于内

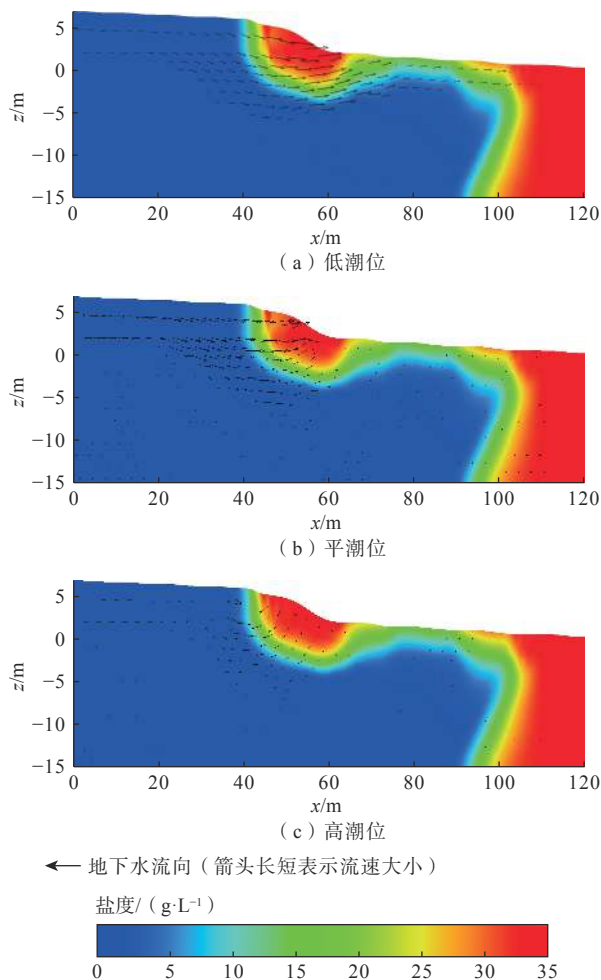


图 4 不同时刻含水层盐度空间分布和水流流速图

Fig. 4 Spatial distribution of groundwater salinity and flow velocity at different times

陆淡水水头, 海水入渗地下含水层的水量增大, 水流向内陆方向流动。整个涨潮过程上盐晕范围越来越大, 表明海水入渗量逐渐增大; 下盐晕形态没有明显变化, 表明海潮作用对于下盐晕形态影响较小。

监测点 H08-1—H08-4 地下水水位、盐度模拟值与观测值的拟合情况见图 5。由于 4 个监测点水位受潮汐作用影响, 将监测点水位分为 2 个阶段: 当潮位高于监测点处高程时, 水位与海潮潮位相同; 当潮位低于监测点处高程时, 监测点潮滩地下水始终处于饱和

状态, 监测点水位为地表高程。由水位拟合曲线可知, 各个监测点的水位拟合情况较好且符合水位变化的客观规律。从盐度拟合情况来看, 监测点 H08-1 位于上盐晕下部, 渗出的地下水为涨潮过程中入渗的海水随着落潮再次从含水层及包气带渗出的再循环海水, 因此, 此处盐度较高, 接近海水盐度; 监测点 H08-2 位于海底地下淡水排泄通道处, 渗出面处盐度较低。这些盐度模拟结果均与实际情况一致, 表明模型参数设置总体可靠。以上结果均表明了参数取值的合理性。

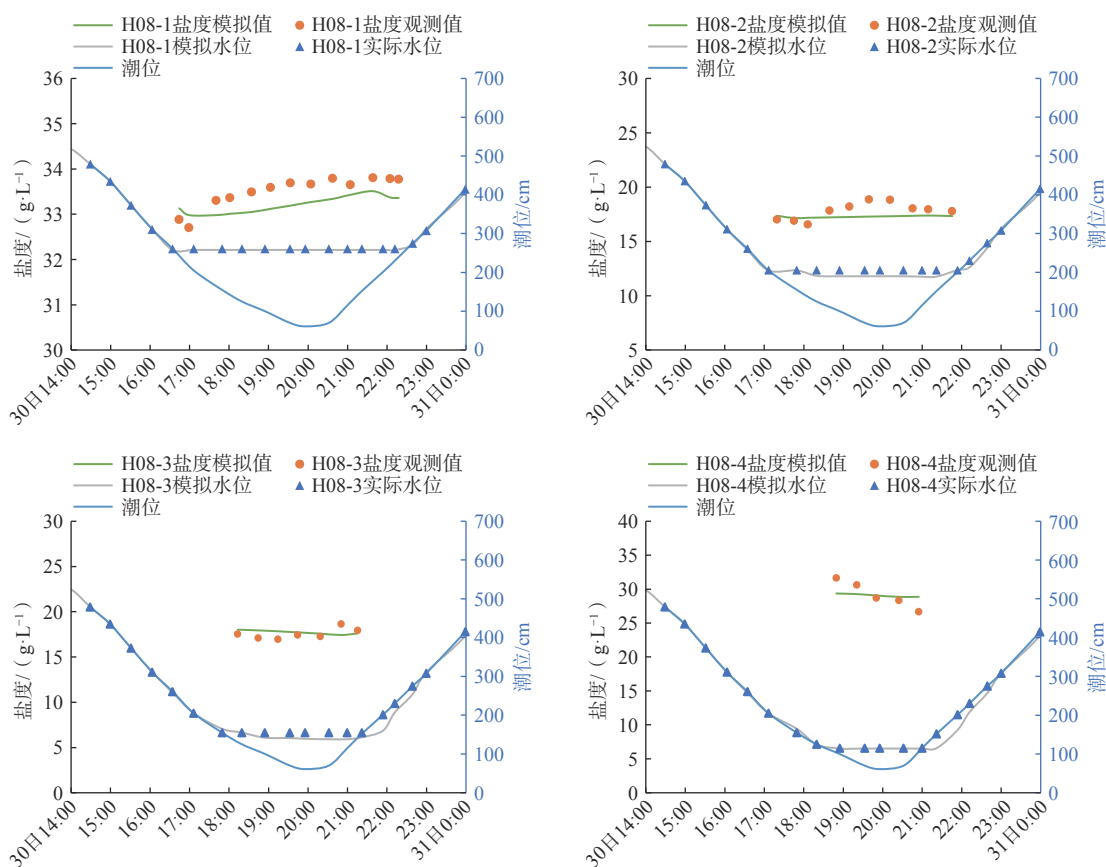


图 5 监测点地下水盐度、水位模拟值与观测值的拟合情况

Fig. 5 Fitting of simulated and observed groundwater salinity and water levels at the monitoring point

3.2 海底地下水排泄量

本研究中海水-地下水各交换量的统计方法为单位时间通过单位宽度的通量, 由于无法直接计算得到海水再循环量, 海水再循环量的计算方法是通过对海底地下水排泄量减去海底地下淡水排泄量获得。

由计算结果可知, SGD 为 $17.47 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 其中 SFGD 为 $3.19 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 占比 18.26%, RSGD 为 $14.28 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$; 同时, 计算出海水入渗量为 $14.28 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 其中包含由潮汐作用下潮滩上边界海水入渗量 $14.16 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 密度梯度作用下盐晕海水侧向净入渗量 $0.12 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$ 。

计算结果表明: (1) 海底地下水排泄量大于海水入渗量, 其中包含了部分海底地下淡水排泄量, 说明一个周期内内陆地下水水头大部分时间高于海水水头; (2) 潮间带潮滩表面海水入渗量远大于密度梯度作用下的海水侧向流入量。

4 讨论

4.1 海水-地下水交换规律

模拟结果显示海底地下水排泄和海水向含水层的入渗是一个交替发生的过程, 但是交替的时间并不

是平潮时刻,在落潮阶段,发生交替的时间略早于平潮位,而在涨潮阶段,发生交替的时间略晚于平潮位;海水入渗速率和海底地下水排泄速率达到峰值时刻分别早于潮位达到高潮和低潮时刻,见图 6。涨潮的后半阶段(高于平潮位以后)才开始发生海水入渗补给地下含水层,随着潮位的继续升高,海水入渗量随之增大。当达到高潮位时,海水入渗量基本达到最高,但有一定的提前量。落潮阶段,随着潮位的下降,海水和地下水水力梯度变小,海水的入渗量也逐渐变小。当潮位下降至接近平潮位时,开始发生海底地下水排泄,且排泄量逐渐增大,此时海水入渗过程停止。海底地下水排泄一直持续到下一次潮位上升到平潮位以上,然后进入新的交替。海底地下水排泄速率达到峰值时刻要早于达到低潮位。这一现象在野外观测过程中也得到验证,在最低潮位时,靠近潮间带中上部的很多溢出现象已经看不到。

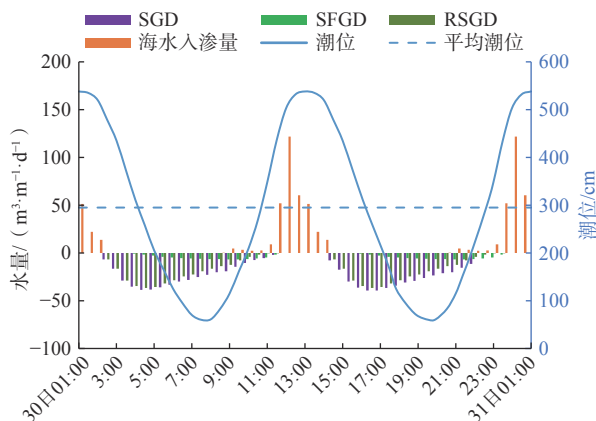


图 6 海水-地下水各交换速率随潮位变化

Fig. 6 Variations in seawater-groundwater exchange rates with tidal level

海底地下水排泄中 SFGD、RSGD 贡献率随潮位的变化情况,见图 7。可以看出不同时刻海底地下水排泄中 SFGD 和 RSGD 的比例也在发生变化。

落潮阶段,从高潮位降至 479 cm 期间,没有海底地下水排泄,原因是海水水头高于内陆水头,仍以海水入渗为主;潮位由 479 cm 降低至 311 cm 期间,海水入渗逐渐消失,海底地下水排泄中海水再循环占主导地位,无海底地下水淡水排泄,原因是海水水头逐渐低于内陆水头,上盐晕部位的饱和带及包气带中的海水再次从渗出面排出,而海底地下水排泄通道处于海水淹没状态且海水水头较高,导致 SFGD 较少;随着潮位继续降低,RSGD 比重开始降低,SFGD 比重升高,原因是海水水头继续降低,与内陆水头形成了较

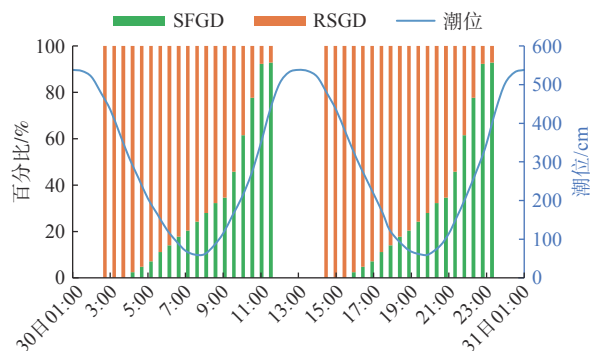


图 7 SFGD 和 RSGD 贡献率随潮位变化

Fig. 7 Contributions of SFGD and RSGD vary with tidal level

大的水头差,在水力梯度驱动下,大量地下淡水从潮滩渗出面排出。

涨潮阶段,由低潮位涨潮至约 260 cm 期间,RSGD 比重逐渐降低,SFGD 比重持续升高。这是由于随着潮位涨到溢出点 H08-1 处,海水入渗量增大,补给渗透性较好的上盐晕处的含水层,渗出量小于入渗量,此时海水水位仍低于内陆淡水水头,在水力梯度的驱动下,海底地下水排泄通道处仍有少量淡水排出。潮位由 260 cm 增长到约 436 cm 期间,RSGD 比重继续降低,SFGD 比重继续升高,此时,以海水入渗为主,只有少量 SFGD 和极少量 RSGD。在潮位 436 cm 升到高潮位期间,只有海水入渗,无海底地下水排泄,SFGD 和 RSGD 均已停止。

整个海底地下水排泄过程中 SFGD 占 18.26%,占 SGD 的比例较小,海水再循环处于主导地位,这也与前人研究吻合^[31-32]。通过对已有代表性研究数据的汇总(表 2)可以看出大多数海湾 SFGD 在 SGD 中占据 2%~10%,有少数海湾 SFGD 比例达到 20% 以上。由此看来,本次研究的典型剖面 SFGD 比例处于较高的水平,但需要说明的是这一结果仅代表该典型剖面的排泄水平,整个湾区不同剖面的排泄量可能存在很大变异性。

4.2 敏感性分析

在水流和溶质运移模型中,渗透系数和弥散系数是两项非常重要的水文地质参数,它们取值的不确定性较高,进而影响地下水模拟结果的可靠性^[39]。同时,内陆地下水水头受到人工开采或降雨影响也会发生较大的变化。因此,针对以上不确定性,在原始模型的基础上分别将两个参数及内陆水头扩大或减小一定的变幅倍数,从潮间带盐度空间分布的角度,研究海底地下水排泄对两个参数及内陆地下水水位的

表 2 已有研究 SGD 案例中 SFGD 的贡献度
Table 2 The contribution of SFGD in studies on SGD

研究区域	SFGD贡献度	研究方法	来源
南大西洋湾	4%	理论模型	文献[33]
瓦奎特湾	32%	渗流仪	文献[34]
瓦奎特湾	36%	Ra、渗流仪	文献[35]
济州岛	20%	渗流仪、Ra、Rn	文献[36]
大南湾(纽约州)	约10%	Ra	文献[37]
曹妃甸	18.2%	数值模拟	文献[30]
莱州湾	4.3% ~ 4.6%	¹⁸ O、Ra、水盐平衡	文献[32]
莱州湾	7.74% ~ 10.26%	Ra、水盐平衡	文献[38]
黄海	5.2% ~ 8.8%	Ra	文献[31]
厦门湾	18.26%	数值模拟	本次研究

敏感性。

4.2.1 渗透系数的影响

渗透系数是溶质运移模型中的重要参数,但很难通过野外试验精确地测量和确定,取值往往具有很大的不确定性。因此,本研究通过将原模型渗透系数分别缩小 50%(图 8a)、扩大 1 倍(图 8c),对比不同渗透

系数(K)影响下对潮间带地下水盐度空间分布,见图 8。

从潮间带地下水盐度空间分布情况看,结果显示不同渗透系数对地下水盐度空间分布具有一定影响。当渗透系数相对于原模型缩小 50% 时,海底地下淡水排泄通道上部的上盐晕面积变大,通道下部的下盐晕位置有向海洋方向移动的趋势,海底地下淡水排泄通道渗出面处地下水盐度有明显的升高,见图 8(a)。当渗透系数相对于原模型扩大 1 倍时,海底地下淡水排泄通道上部的上盐晕面积变小,通道下部的下盐晕位置有向内陆方向移动的趋势,海底地下淡水排泄通道渗出面盐度降低明显,见图 8(c)。这是由于随着渗透系数的增大,水循环速度变快,地下淡水排泄量增大,导致淡水通道上部边界海水入渗量减小,上盐晕面积减小,海底地下淡水排泄通道渗出面处地下水盐度降低,下盐晕向内陆移动。结果表明海底地下水排泄对渗透系数存在一定的敏感性,但整体来看,咸淡水的分布特征没有发生明显的变化。

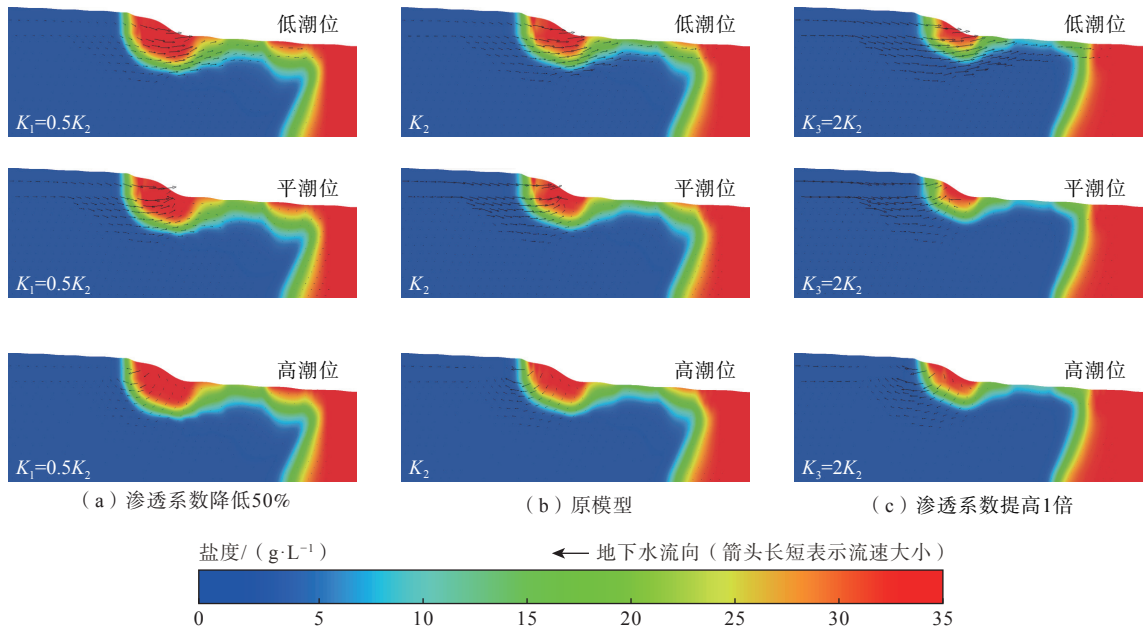


图 8 不同渗透系数下潮间带地下水盐度空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of groundwater salinity in the intertidal zone under different permeability coefficients

4.2.2 弥散系数的影响

RSGD 是海底地下水排泄的重要组成部分,而弥散系数对于沿海 RSGD 是一项重要参数^[40],取值通常会有很大的不确定性。因此,本研究通过将原模型弥散系数缩小 50%(图 9a)、扩大 1 倍(图 9c),对比不同弥散系数(D)影响下的潮间带地下水盐度空间分布,见图 9。

不同弥散系数对地下水盐度空间分布影响较小,当弥散系数缩小 50% 时,海底地下淡水排泄通道上部的上盐晕与下部的下盐晕的面积和位置基本没有变化,但海水与淡水混合带的宽度变窄,见图 9(a)。当弥散系数扩大 1 倍时,海底地下淡水排泄通道上部的上盐晕与下盐晕的面积和位置基本没有变化,但咸水体周边的扩散范围变大,见图 9(c)。说明弥散系数对

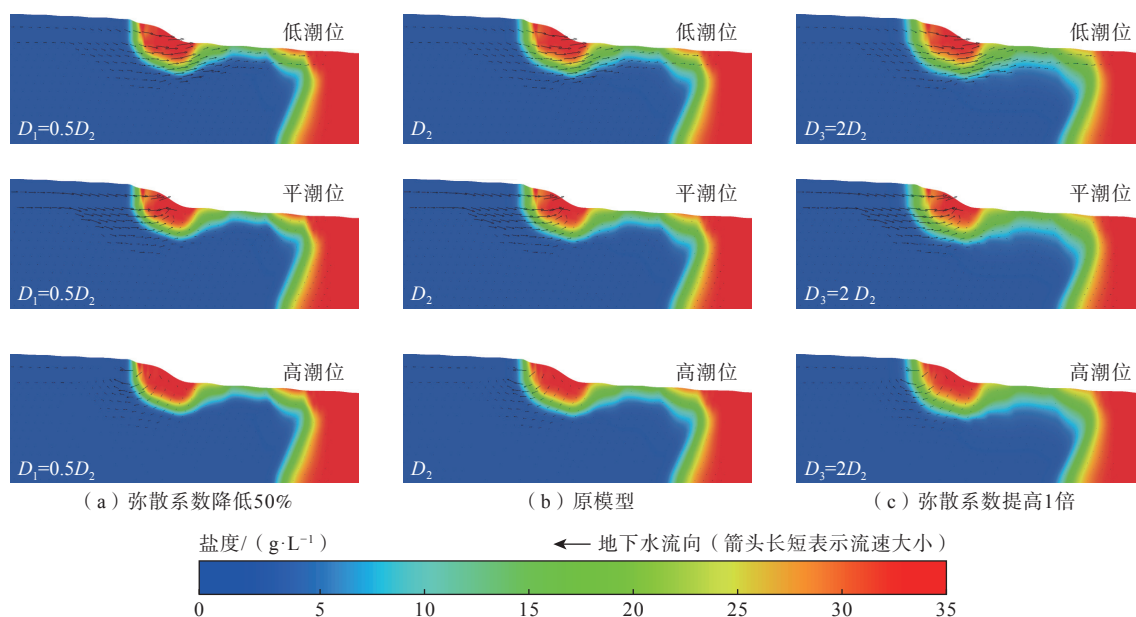


图 9 不同弥散系数下潮间带地下水盐度空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of groundwater salinity in the intertidal zone under different dispersion coefficients

潮间带地下水盐度空间分布有一定的影响,但影响程度较小。

4.2.3 内陆水头的影响

在内陆方向上,地下水水头是海底地下淡水排泄的主要驱动力,内陆水头对于海底地下水排泄产生很大影响。因此,本研究将原模型内陆边界定水头($d_2=5\text{ m}$)降低 20%(图 10a),升高 20%(图 10c),对比不同内陆水头(d)影响下的潮间带地下水盐度空间分布,见图 10。

从盐度空间分布情况来看,模拟结果显示内陆水头对地下水盐度空间分布影响较大。当内陆水头降低 20% 时,海底地下淡水排泄通道上部的上盐晕面积增大 3~4 倍,将近占据了整个剖面,通道下部的下盐晕范围明显向内陆方向移动,同时,海水与淡水混合带的宽度明显变宽,见图 10(a);当内陆水头升高 20% 时,淡水排泄通道上部的上盐晕面积变小,通道下部的下盐晕有向海洋方向移动的趋势,海水与淡水混合带的宽度明显变窄,见图 10(c);这是由于地下水

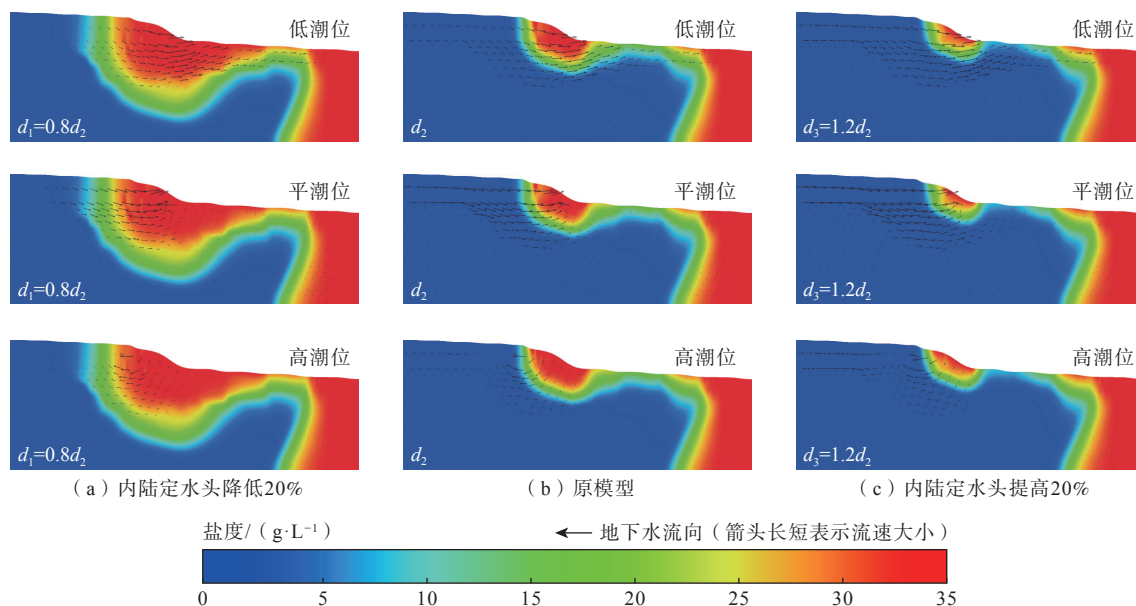


图 10 不同内陆水头下潮间带地下水盐度空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of groundwater salinity in the intertidal zone under different inland hydraulic heads

水力梯度是海底地下淡水排泄的主要驱动力, 当内陆水头降低时, 地下水水力梯度降低, 海水水头高于内陆水头, 在海潮作用下, 潮滩上部海水入渗量增大, 从而使上盐晕面积增大; 当内陆水头升高时, 地下水水力梯度增大, 海水水头低于内陆水头, 淡水排泄量增大, 潮滩上部海水入渗量减小, 从而使上盐晕面积变小。结果表明: 海底地下水排泄对内陆水头存在很大

程度的敏感性。

H08-1—H08-4 监测点不同参数下的盐度模拟值与观测值拟合情况, 见图 11。原始模型的盐度拟合曲线较好, 证明了本研究所给定参数的合理性。

通过以上对比发现, 海底地下水排泄对内陆淡水水头的敏感性较高, 而对弥散系数和渗透系数的敏感性相对较低。

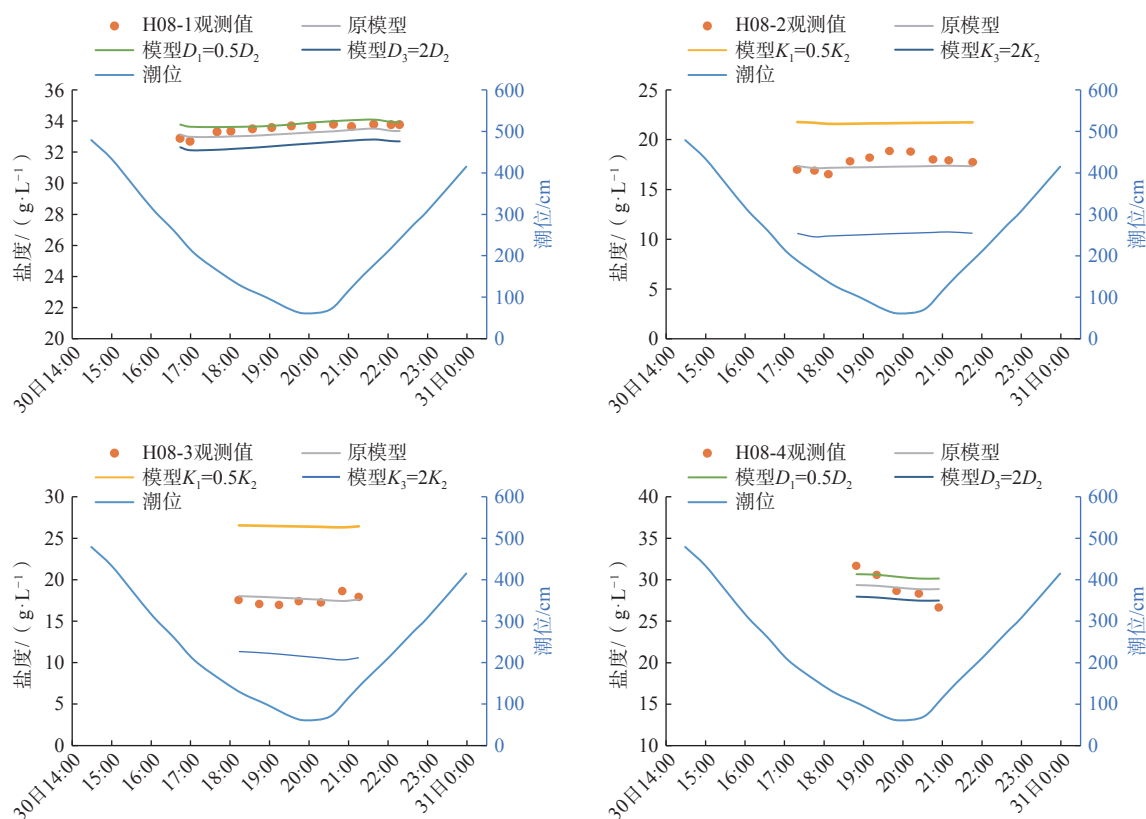


图 11 不同参数地下水盐度拟合情况

Fig. 11 Fitting of groundwater salinity under different parameters

5 结论

(1) 厦门湾局部潮间带海水与地下水交换较为频繁, 存在着明显的海底地下淡水排泄, 且排泄量较为可观, 观测到的潮间带地下水盐度最低只有 16.54 g/L, 明显低于同时段海水的盐度, 说明有较多的地下淡水混入。

(2) 基于盐度模拟方法估算出典型剖面的海底地下水排泄量为 $17.47 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 其中海底地下淡水排泄量为 $3.19 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 占比 18.26%; 海水再循环量为 $14.28 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 占比 81.74%, 与其他研究相比, 该典型剖面海底地下淡水排泄量占比处于较高水平。海水再循环量中, 潮滩上表面海水入渗量 $14.16 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 下盐晕侧向净入渗量 $0.12 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$, 说明潮间带潮滩

上表面的海水入渗量远大于密度梯度作用下的海水侧向流入量。

(3) 厦门湾潮间带海底地下水排泄和海水入渗是一个交替发生的过程, 在落潮阶段, 发生交替的时间略早于平潮位, 在涨潮阶段, 发生交替的时间略晚于平潮位; 海底地下水排泄速率和海水入渗速率达到峰值时刻也都分别早于低潮和高潮时刻; 在整个潮汐周期内(从高潮时刻到下一个高潮时刻)呈现出地下淡水排泄比例逐渐增大, 再循环海水排泄比例逐渐减小的规律。

(4) 通过敏感性分析可知, 海底地下水排泄对内陆地下水水头的敏感性大于渗透系数和弥散系数, 海底地下水排泄对渗透参数的敏感性大于弥散系数。

参考文献 (References) :

- [1] MOORE W S. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2: 59 – 88.
- [2] 李海龙, 王学静. 海底地下水排泄研究回顾与进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(6): 636 – 646. [LI Hailong, WANG Xuejing. Submarine groundwater discharge: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(6): 636 – 646. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王一清, 吴自军. 海底地下水排泄对海洋锶储库的影响[J]. *地质论评*, 2022, 68(3): 1079 – 1088. [WANG Yiqing, WU Zijun. The effect of submarine groundwater discharge on marine strontium budget[J]. *Geological Review*, 2022, 68(3): 1079 – 1088. (in Chinese with English abstract)]
- [4] BURNETT W C, BOKUNIEWICZ H, HUETTEL M, et al. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66(1): 3 – 33.
- [5] SANTOS I R, EYRE B D, HUETTEL M. The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: A review[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2012, 98: 1 – 15.
- [6] SANTOS I R, BURNETT W C, CHANTON J, et al. Land or ocean? : Assessing the driving forces of submarine groundwater discharge at a coastal site in the Gulf of Mexico[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C4): 1 – 11.
- [7] ABBOTT B W, BISHOP K, ZARNETSKY J P, et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(7): 533 – 540.
- [8] LUIJENDIJK E, GLEESON T, MOOSDORF N. Fresh groundwater discharge insignificant for the world's oceans but important for coastal ecosystems[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1260.
- [9] BAUDRON P, COCKENPOT S, LOPEZCASTEJON F, et al. Combining radon, short-lived radium isotopes and hydrodynamic modeling to assess submarine groundwater discharge from an anthropized semiarid watershed to a Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain)[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 55 – 71.
- [10] KWON E Y, KIM G, PRIMEAU F, et al. Global estimate of submarine groundwater discharge based on an observationally constrained radium isotope model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(23): 8438 – 8444.
- [11] SANTOS I R, CHEN Xiaogang, LECHER A L, et al. Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(5): 307 – 323.
- [12] TAMBORSKI J J, ROGERS A D, BOKUNIEWICZ H J. Investigation of submarine groundwater discharge to tidal rivers: Evidence for regional and local scale seepage[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(3): 716 – 730.
- [13] CHENG K H, LUO X, JIAO J J. Two-decade variations of fresh submarine groundwater discharge to Tolo Harbour and their ecological significance by coupled remote sensing and radon-222 model[J]. *Water Research*, 2020, 178: 115866.
- [14] FU Tengfei, ZHANG Yufeng, XU Xingyong, et al. Assessment of submarine groundwater discharge in the intertidal zone of Laizhou Bay, China, using electrical resistivity tomography[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106972.
- [15] KURYLYK B L, IRVINE D J, MOHAMMED A A, et al. Rethinking the use of seabed sediment temperature profiles to trace submarine groundwater flow[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(7): 4595 – 4614.
- [16] LEROUX N K, KURYLYK B L, BRIGGS M A, et al. Using heat to trace vertical water fluxes in sediment experiencing concurrent tidal pumping and groundwater discharge[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(2): e2020WR027904.
- [17] LIU Jun, CHENG Yanpei, ZHANG Feng'e, et al. Research hotspots and trends of groundwater and ecology studies: Based on a bibliometric approach[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2023, 11(1): 20 – 36.
- [18] BAKHTYAR R, BROVELLI A, BARRY D A, et al. Transport of variable-density solute plumes in beach aquifers in response to oceanic forcing[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 53: 208 – 224.
- [19] WERNER A D, BAKKER M, POST V E A, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 3 – 26.
- [20] ROBINSON C, XIN Pei, LI Ling, et al. Groundwater flow and salt transport in a subterranean estuary driven by intensified wave conditions[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(1): 165 – 181.
- [21] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第八分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. [China Gulf Chronicles Compilation Committee. China gulf chronicles(Volume 8)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993. (in Chinese)]
- [22] WANG Jining, MENG Yonghui. Characteristics analysis and model prediction of sea-salt water intrusion in lower reaches of the Weihe River, Shandong Province, China[J]. *Journal of Groundwater Science and*

- Engineering, 2016, 4(2): 149 – 156.
- [23] CHANG Yawen, HU B X, XU Zexuan, et al. Numerical simulation of seawater intrusion to coastal aquifers and brine water/freshwater interaction in south coast of Laizhou Bay, China[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 215: 1 – 10.
- [24] 王佳琪, 郭芷琳, 田勇, 等. 海水入侵模拟方法 VFT3D 及应用 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 184 – 194. [WANG Jiaqi, GUO Zhilin, TIAN Yong, et al. Development and application of sea water intrusion models[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 184 – 194. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 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)]
- [26] BAKHTYAR R, BROVELLI A, BARRY D A, et al. Wave-induced water table fluctuations, sediment transport and beach profile change: Modeling and comparison with large-scale laboratory experiments[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(1): 103 – 118.
- [27] 常雅雯, 胡晓农, 张汉雄, 等. 泥质潮滩的海水-地下水交换量化研究——以莱州湾南岸为例 [J]. 海洋通报, 2018, 37(4): 450 – 458. [CHANG Yawen, HU B X, ZHANG Hanxiong, et al. Quantifying seawater-groundwater exchange rates in muddy tidal flat: A case study of the south coast of the Laizhou Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(4): 450 – 458. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 黄文辉, 林国平, 郑祖南. 厦门市区域水文地质调查报告 [R]. 厦门: 厦门地质工程勘察院, 1999. [HUANG Wenhui, LIN Guoping, ZHENG Zunan. Regional hydrogeological survey report of Xiamen City[R]. Xiamen: Xiamen Geological Engineering Survey Institute, 1999. (in Chinese)]
- [29] 李亚松, 刘春雷, 郝奇琛, 等. 厦漳泉同城化地区综合地质调查报告 [R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 2022. [LI Yasong, LIU Chunlei, HAO Qichen et al. Comprehensive geological survey of Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou integration region project[R]. Shijiazhuang: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 郑涛. 曹妃甸地区海底地下水排泄的定量化研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. [ZHENG Tao. Quantitative submarine groundwater discharges in Caoifeidian[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [31] LIU Jianan, DU Jinzhou, YU Xueqing. Submarine groundwater discharge enhances primary productivity in the Yellow Sea, China: Insight from the separation of fresh and recirculated components[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(6): 101204.
- [32] WANG Qianqian, ZHANG Xiaolang, WANG Xuejing, et al. Quantification of the water age and submarine groundwater discharge in a typical semi-enclosed bay using stable oxygen (^{18}O) and radioactive radium (^{228}Ra) isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127088.
- [33] LI L, BARRY D A, STAGNITTI F, et al. Submarine groundwater discharge and associated chemical input to a coastal sea[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(11): 3253 – 3259.
- [34] MICHAEL H A. Seasonal dynamics in costal aquifers: Investigation of submarine groundwater discharge through field measurements and numerical models[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [35] MICHAEL H A, CHARETTE M A, HARVEY C F. Patterns and variability of groundwater flow and radium activity at the coast: A case study from Waquoit Bay, Massachusetts[J]. *Marine Chemistry*, 2011, 127(1/2/3/4): 100 – 114.
- [36] KIM G, LEE K K, PARK K S, et al. Large submarine groundwater discharge (SGD) from a volcanic island[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21): 2098.
- [37] BECK A J, RAPAGLIA J P, COCHRAN J K, et al. Submarine groundwater discharge to Great South Bay, NY, estimated using Ra isotopes[J]. *Marine Chemistry*, 2008, 109(3/4): 279 – 291.
- [38] WANG Xuejing, LI Hailong, JIAO J J, et al. Submarine fresh groundwater discharge into Laizhou Bay comparable to the Yellow River flux[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8814.
- [39] 李露露, 张秋兰, 李星宇, 等. 高放废物深地质处置地下水数值模拟应用综述 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 43 – 53. [LI Lulu, ZHANG Qiulan, LI Xingyu, et al. Review of groundwater numerical simulation for deep geological disposal of high-level radioactive waste[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 43 – 53. (in Chinese with English abstract)]
- [40] HENRY H R. Interfaces between salt water and fresh water in coastal aquifers[J]. *US Geological Survey Water-Supply Paper*, 1964: C35-70.