

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.468>



华南滨海火山岛地下水动态对海潮的响应特征

曾 港¹, 陈建耀^{1*}, 董林垚^{2,3}, 李绍恒¹, 金广哲⁴, 吴瑞钦⁵, 付丛生⁶

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东广州 510275
2. 长江水利委员会长江科学院, 湖北武汉 430010
3. 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北武汉 430010
4. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东湛江 524088
5. 广东省水文局湛江水文分局, 广东湛江 524043
6. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏南京 210008

摘 要: 海潮是驱动地下水动态变化的动力基础, 为探讨海潮对广东省硇洲岛地下水动态的影响, 以地下水位和盐分作为主要指标, 采用功率图谱分析地下水动态相对潮汐的频率特征, 结合小波变换和互相关方法分析地下水动态的振幅和位相特征. 结果表明: (1) 硇洲岛海潮对地下水位的水平影响距离约为 400~500 m. (2) 离海距离、含水层特性是影响地下水对海潮响应的主要因素. (3) 硇洲岛西北侧近海第四纪中砂层中存在海水进入地下淡水的通道, 当含水层对海潮的水动力响应好且存在联系海水的通道时, 海水盐分更易传输到地下淡水中. 地下水动态对海潮的响应分析可以有效识别海潮的影响范围, 从而为岛屿或近岸地下水咸化现象提供重要依据.

关键词: 地下水; 火山岛; 功率谱分析; 小波分析; 互相关分析; 水动力响应; 水文地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2025)05-2072-11

收稿日期: 2022-08-29

Response Characteristics of Groundwater Dynamics to Ocean Tide in Volcanic Island of South China

Zeng Gang¹, Chen Jianyao^{1*}, Dong Linyao^{2,3}, Li Shaoheng¹, Jin Guangzhe⁴, Wu Ruiqin⁵, Fu Congsheng⁶

1. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China
2. Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China
3. Research Center on Mountain Torrents and Geological Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China
4. College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China
5. Zhanjiang Hydrology Bureau of Guangdong Provincial Hydrology Bureau, Zhanjiang 524043, China
6. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Ocean tide is the dynamic basis driving the hydrodynamic changes of groundwater. In order to explore the influence of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.41977171, 41771027); 广东省水利厅水利科技创新项目 (No.2020-09); 广东省自然资源厅地下水资源调查监测评价项目 (No.0835-210Z22803141).

作者简介: 曾港 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事滨海地区地下水环境研究工作. ORCID: 0000-0002-4449-0529. E-mail: zengg7@mail2.sysu.edu.cn

* 通讯作者: 陈建耀, E-mail: chenjianyao@mail.sysu.edu.cn

引用格式: 曾港, 陈建耀, 董林垚, 李绍恒, 金广哲, 吴瑞钦, 付丛生, 2025. 华南滨海火山岛地下水动态对海潮的响应特征. 地球科学, 50(5): 2072-2082.

Citation: Zeng Gang, Chen Jianyao, Dong Linyao, Li Shaoheng, Jin Guangzhe, Wu Ruiqin, Fu Congsheng, 2025. Response Characteristics of Groundwater Dynamics to Ocean Tide in Volcanic Island of South China. *Earth Science*, 50(5): 2072-2082.

ocean tide on the groundwater dynamics in Naozhou Island, Guangdong Province, the groundwater level and salinity were used as the main indicators, and the frequency characteristics of groundwater dynamics relative to tides were analyzed by power spectrum. Moreover, the amplitude and phase of groundwater dynamics were analyzed by combining wavelet transform and cross-correlation methods. The results show follows: (1) The response of groundwater to tidal loading has a certain spatial range. The horizontal influence of ocean tide on the groundwater level in Naozhou Island is about 400—500 m. (2) The distance from the sea and the aquifer properties are the main factors affecting the hydrodynamic response to the tide. (3) The channel connecting groundwater and seawater in Naozhou Island is distributed in the Quaternary medium sand layer. When the aquifer has a good hydrodynamic response to the tide and good connectivity with seawater, the seawater salt is more easily transmitted to the groundwater. The response analysis of groundwater dynamics to ocean tides can identify the influence range of ocean tides effectively, providing an important basis for the salinity phenomenon of groundwater in the island or nearshore areas.

Key words: groundwater; volcanic island; power spectrum analysis; wavelet analysis; cross-correlation analysis; hydrodynamic response; hydrogeology.

0 引言

地下水是滨海地区重要的供水来源,海潮是驱动地下水动态变化的动力基础(Fang *et al.*, 2021).海潮将对含水层骨架的压力传递给含水层介质,从而导致地下水位产生波动(Doan *et al.*, 2006).此外,海水盐分随潮汐波动发生迁移,进而影响到地下水和海水交互作用的两个主要过程:海水入侵和海底地下水排泄(Abarca *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2021).滨海地区陆续发现的地面沉降(骆祖江等, 2024)、地下水水质恶化(黄金瓯等, 2021)等环境地质问题甚至会导致生态系统的退化,而地下水动态研究可为相关问题解决提供有效理论支持.

潮汐信号具有不同的周期性波动成分,如半日潮波、全日潮波、朔望—方照潮波,其相对高频信号在传递过程中更易受到含水层的阻尼作用(Rotzoll *et al.*, 2008; Trglavcnik *et al.*, 2018).含水层中水位和盐分随潮汐波动存在周期性的变化特征, Kim *et al.* (2005)发现地下水位和盐分波动中存在 15.4 d 和 0.52 d 周期,这与当地潮汐的周期类似. Robinson *et al.* (2007)指出朔望月周期内的潮汐强度会影响盐分分布,从大潮到小潮过渡期间,地下水与海水之间的动力交互减弱.实际上,地下水位、盐分对于外界荷载都有响应,但其对不同周期信号的响应程度不同(Lovrinović *et al.*, 2022),低频率波动信号主要控制盐分的运移,而高频率波动信号对水位的动力影响更显著(Rizzo *et al.*, 2020; Alcaraz *et al.*, 2021).提取不同频段下水位和盐分的波动信号将为地下水对海潮的响应分析提供更加明确的指示.

关于滨海含水层对海潮响应的影响因素研究大多集中在:(1)波动信号的特性,如周期、振幅等;

(2)地下水和海水间的联系,包括水动力影响范围、是否存在联系通道等;(3)含水层特性,如物理结构、水力性质等(Trglavcnik *et al.*, 2018).潮汐向内陆含水层水平推进中,会导致地下水位波动振幅减少、滞后时间增加(Carr and van Der Kamp, 1969; Kim *et al.*, 2005; Zhang, 2021).潮汐沿垂直方向传递到不同深度含水层,动力混合强烈(Sheng *et al.*, 2020),能量衰减显著(Bakker, 2019).此外,含水层岩性颗粒、渗透性等特性会使潮汐信号传递更加复杂(Cuello and Guarracino, 2020).均质模型假设下地下水动态的响应规律已开展大量研究,而由于实际的水文地质环境具有空间异质特征,基于真实的地下水系统观测来分析影响地下水动态的主要因素却少有研究.

火山岛由海底火山喷发物堆积形成,一般面积较小,地势高峻,对地表水的拦蓄条件差,地下淡水资源有限且主要受海潮动力和降水分布的控制(Purnomo *et al.*, 2021).华南沿海第四纪岩浆活动强烈,在多次、多中心、间歇性火山喷发下,形成涠洲岛、斜阳岛、硇洲岛等数个古火山岛(赵焕庭, 1988).硇洲岛地处华南沿海,是中国面积最大的火山岛,地下水是其唯一的供水水源,20世纪初,岛内陆续发现浅层、部分中层地下水水质咸化,岛上居民的用水安全受到威胁.但学界大多仅通过地下水资源量(罗伟宇, 2020)及地下水质的评估(曹基富等, 2014; 郑王琼, 2017)来判定海水对地下水资源的影响,目前对于潮汐驱动下硇洲岛地下水动态的研究尚未进行,水动力方面的证据将为硇洲岛地下水咸化问题提供更全面的认识.为了探讨海潮在传递时对硇洲岛地下水位的周期、振幅、位相延迟方面的作用特征,以及地下水盐分在太阳日和朔望月

周期内的传输特征,本文先布设高分辨率传感器以获取水位和电导序列,再采用功率谱分析识别地下水波动的主要频率,结合小波分析构建信号在不同频率域内的波动过程.此外,通过分析地下水对海潮的水动力响应、含水层介质的影响,来探讨影响硇洲岛地下水动态变化的主要因素.

1 数据采集与方法

1.1 研究区概况

硇洲岛是广东省唯一的火山岛,由玄武岩夹凝灰岩构成,多黑岩出露.该岛地处湛江市东南方向 40 km,北傍东海岛,西依雷州湾,东临南海,面积为 49.77 km²,人口密度为 801 人/km².全岛兼有热带和亚热带季风气候,同时受海洋气候调节,全年气候温和,雨季集中在 5~6 月和 8~9 月,此间降雨量约占全年的 85%(郑王琼,2017).岛上地貌以玄武岩台地为主,间有海蚀阶地、滨海狭窄平原和沿海滩地(罗炜宇,2020).以硇洲岛的西北-东南方向连线为界,界限以西地势较低,平均潮差小,分布淤泥质海滩,形成以红树林为主的植被群落.界限以东地势较高,平均潮差大,沿岸的砂质海岸种植着以木麻黄为主的防风固沙林.接近岛屿中心处,多为火山岩台地地形,最高点高程为 81.6 m,此处易受双侧潮流及潮汐的共同影响(图 1).

根据 1:20 万雷州半岛区域水文地质普查报告,本区含水层主要由以火山口为中心的火山熔岩和赋水性良好的第四纪砂砾沉积层构成,前者分布于地表浅层,地下水类型为火山岩孔洞裂隙水,后者为前者所覆盖,地下水类型为松散岩类孔隙水.地下水可同时接受本岛和来自大陆深层地下水的补充,水量较丰富,人工开采、蒸发是地下水主要的排泄方式,侧向径流入海也可能是排泄途径(郑王琼,2017).地下水按含水层埋藏深度、水力特征,又可分为浅层潜水及微承压水(埋藏深度一般<30 m)、中层承压水(30~200 m)、深层承压水(>200 m),浅层水和中层水、中层水和深层水之间分别有一个弱透水层,可作为相对隔水层(苏肇汉,1997).

1.2 数据获取与分析

设置传感器采集硇洲岛地下观测井、海潮水位及电导数据,同步收集当地的气压及降水数据.监测水位和电导的设备为 Solinst Levellogger 5 LTC 地下水自动记录仪,水位记录的分辨率为 0.000 6 m,误差为 0.015 m,电导记录的分辨率为 0.1 μS·cm⁻¹,误差

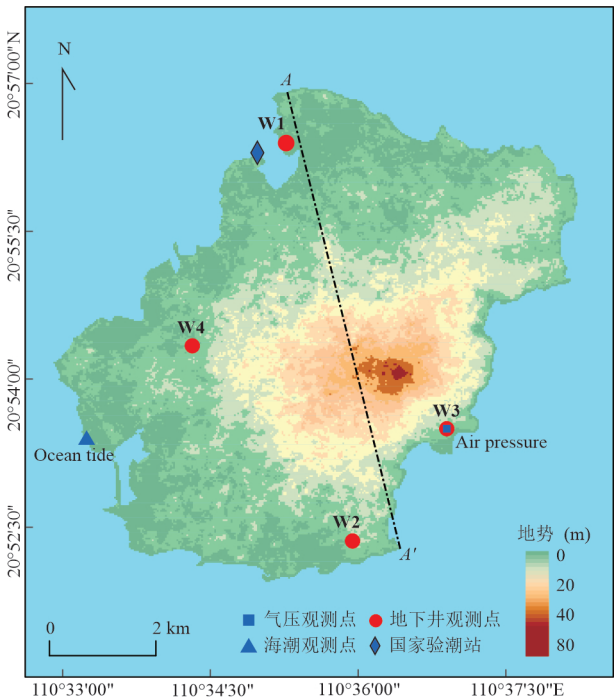


图 1 硇洲岛观测点布设图

Fig.1 Naozhou Island observation point layout map

表 1 地下观测井的基本情况

Table 1 The basic information of groundwater observation wells

地下观测井	W1	W2	W3	W4
离海距离(m)	63	479	218	1 462
井顶部高程(m)	3	14	10	13
实际井深(m)	86	148	50	23
水位埋深(m)	11	24	6	10

注:高程基准为 1985 国家高程基准,以黄海 1952~1979 多年平均海平面作为基准面.

为 1 μS·cm⁻¹.监测气压的设备为 CTD-Diver 压力传感器,分辨率为 0.01 m H₂O,误差为 0.05 m H₂O.其中,将地下水自动记录仪分别放置于硇洲岛西南角海潮观测点(Ocean tide)及地下观测井 W1~W4 中,压力传感器则设置于地下观测井 W3 中.连续观测时间为 2021 年 1 月 17 日至 3 月 12 日,采样间隔设置为 5 分钟.采样期间的降水量资料来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)的地面气象站逐时数据,此外利用国家海洋信息中心(<http://global-tide.nmdis.org.cn>)的验潮站逐时潮高与实测潮汐水位进行验证对比.研究区的水文地质资料由湛江市水文局和广东省环境监测总站提供.气象站、观测点、验潮站的设置见图 1,选取的地下观测井的基本情况如表 1 所示.

由于地下水位传感器获得水柱压力时,包含了大气压力,须先前扣除气压以得到实际的水位波动数据.采集到的样本序列可视为随机信号,其周期成分可视为由不同频率的规则波叠加而成.根据 Nyquist 定律,当采样频率大于实际最高频率的 2 倍时($f_s(\max) > 2f(\max)$),利用功率谱分析可得到序列中的能量随频率的分布情况,据此分析主要周期成分(McMillan *et al.*, 2019).此外,由于功率谱分析适用于平稳随机过程,因此运算前需对实际的水位波动数据进行标准化处理.功率谱分析的计算公式如下(何平, 2016):

$$\hat{s}_p(\omega) = \frac{1}{N} |X_N(\omega)|^2 = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_N(n) e^{-j\omega n} \right|^2, \quad (1)$$

式中: $\hat{s}_p(\omega)$ 为采用周期图法得到的功率谱估计, $x_N(n)$ 样本序列, $X_N(\omega)$ 为通过傅里叶变换得到的复数序列, N 为样本序列长度, $n = [0, N-1]$.

基于傅里叶变换的功率谱分析对于非平稳信号的变换可能会丢失局部突变信息,而小波分析对局部突变信息有良好的表征能力,可以检测到非平稳信号中的瞬态特征并显示其频率成分(董长虹等, 2004).小波分析法是基于特定的小波基函数,对任意离散时间序列信号 $f(t)$,通过 Mallat 算法进行分解和重构,从而提取出信号中多种时间尺度成分,具体步骤如下:(1)先通过下采样将样本的时间序列分解成 n 个细节分量 $R_i f(i=1, 2, 3, \dots, n)$ 和 1 个近似信号 $P_n f$;(2)再将不同的细节、近似信号进行上采样,重构得到不同频率范围内时间序列(Mallat, 1989).计算公式如下:

$$f(t) = \sum_i R_i f(t) + P_n f(t), \quad (2)$$

互相关分析主要用于描述两组数据的时间滞后效应及相关程度(李严等, 2021).先后输入长度均为 N 的两组离散样本序列 $\{x(n)\}$ 、 $\{y(n)\}$,假设这两组序列的时间延迟量为 k ,计算公式如下(何平, 2016).求出两组序列的互相关系数后,可绘制 k 与 $\widehat{r_{x,y}}$ 的互相关图,其中 $\widehat{r_{x,y}}$ 中最大互相关系数对应的横坐标 d ,表示 $\{y(n)\}$ 滞后于 $\{x(n)\}$ 的时间(d 为负值代表滞后).

$$\widehat{r_{x,y}}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-k-1} x_N^*(n) y_N(n+k), \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (3)$$

式中:“*”表示复共轭,若两组序列为实过程,“*”可去掉.

本文中所用的统计分析算法均通过 Matlab 编程实现.

2 结果

2.1 地下水位波动的基本特征

W1、W2 的水位波动形态与海潮相似,具有明显周期性,而 W3、W4 的波动形态没有明显的周期性(图 2).观察 W1、W2 的 12 h、24 h、15 d 的周期特征:(1)12 h 的潮汐周期体现半日潮波的影响,主要包含 1 个相对高潮和低潮期,且相邻高潮、低潮对应的最大振幅不等.(2)相隔潮位对应的最大振幅基本相等,说明也存在 24 h 的潮汐周期,体现全日潮波的影响.(3)最高/最低水位每隔约 15 d 会再次出现,体现的则是朔望-方照潮波的影响,在朔望潮或大潮(Spring tide, St)期间,潮差为极大值,在方照潮或小潮(Neap tide, Nt)期间,潮差为极小值.

大气降水会直接影响含水层中水量,从而引起地下观测井中的水位变化,W4 的水位上升与降雨量存在良好正相关.气象站降水量资料如图 2 所示,观测期为枯水期,持续无雨近 23 d 后,W4 水位达最低值,2021 年 2 月 9 日湛江市内出现强降雨,累计降水量达 79.9 mm.此次降雨事件发生后,W4 的水位呈明显上升趋势,水位最高变幅达 6.0 m.

2.2 地下水的波动频率

功率谱分析给出海潮水位、大气压力、地下观测井 W1~W4 水位波动的主要频率,在相对高频($T < 33$ h)范围内,W1、W2 的主要峰频及峰能序列与海潮基本一致.W3、W4 中谱峰的能量不突出,全日分潮对应峰频与气潮相似.潮汐由多个理论分潮组成,如太阴全日分潮 O_1 (25.82 h)和太阴半日分潮 M_2 (12.42 h),月球引力作用下 O_1 、 M_2 分潮对海潮波动的影响大,对气潮波动的影响较小,二者具有不同的潮汐波特征(Trefry and Bekele, 2004).从图 3 可知:(1)W1、W2 最高能量峰对应 M_2 分潮,体现以不规则半日潮为主的潮汐能量,符合雷州湾附近海域的潮汐特征(郑有任等, 2012),全日分潮能量以 O_1 和 K_1 分潮为主,浅水分潮 MK_3 (8.18 h)、 M_4 (6.21 h)、 M_6 (4.14 h)的能量峰也较明显,其水位波动频率的分布及能量同海潮类似,受海潮影响显著(图 3a, 3c, 3d).(2)W3、W4 水位波动频率的能量较低,全日潮的能量大于半日潮,能量相对较大的能量峰与气潮谱峰中的 ρ 分潮对应(图 3b, 3e, 3f).

在相对高频($T < 33$ h)范围内,W1、W2 电导波

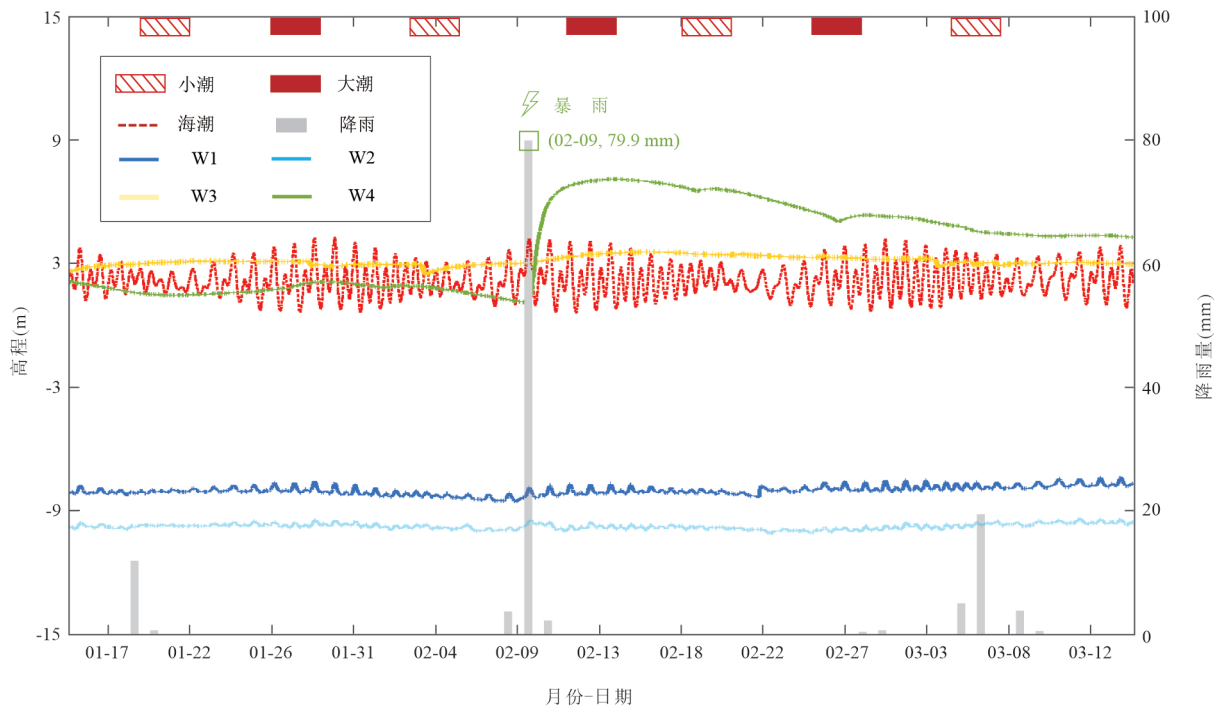


图 2 海潮观测点和地下观测井 W1~W4 的水位高程变化

Fig.2 Variation of water level elevation at tide observation points and wells W1-W4

高程基准为 1985 国家高程基准,以黄海 1952~1979 多年平均海平面作为基准面

表 2 地下观测井 W1~W4 在 D6~D8 频段内的有效波高及位相延迟

Table 2 Effective wave height and phase delay of wells W1-W4 in frequency bands D6-D8

波成分	周期(h)	海潮有效波高(m)	地下水				地下水位			
			有效波高(m)				相对海潮位相延迟(h)			
			W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4
D8	10~30	1.65	0.31	0.15	0.09	-	1.8	2.3	51.6	-
D7	5~15	2.29	0.30	0.18	0.06	-	0.4	0.6	123.3	-
D6	2~10	0.59	-	-	-	0.01	-	-	-	208.3

注:-表示互相关计算中没有得到有效结果。

动信号的主要峰频比水位中对应峰频的能量密度低且谱峰不突出.从图 4 可知:(1)W1 中的电导谱峰分布呈现山包状,W2 的电导谱峰呈现不规则锯齿状且其形态与水位谱峰相似.(2)W1 和 W2 在全日分潮($T\approx 24\text{ h}$)、半日分潮($T\approx 12\text{ h}$)处电导谱峰的平均能量相比对应的水位谱峰分别降低 202 dB、173 dB.由于潮汐波直接通过含水层骨架将荷载传递到含水层,而盐分物质需要通过含水层孔隙传输给含水层,物质传输相比力的传递存在能量耗失和时间滞后,故 W1、W2 电导谱相比水位谱具有谱峰能量减弱、相邻谱峰分离度低、谱峰不突出的特点.

2.3 地下水位 的振幅与位相

潮汐效率是地下水位波高与对应的海潮波高之比,根据表 2 中有效波高和位相延迟的结

果,选择 W1~W3 与海潮在 D7 频段内有效波高,W4 与海潮在 D6 频段内有效波高,计算出 W1~W4 的潮汐效率分别为 13%、8%、3%、2%,对应的位相延迟分别为 0.4 h、0.6 h、123.3 h、208.3 h,呈现出海潮在向岛内含水层传递过程中能量逐渐减弱、滞后时间逐渐增加的趋势.此外,潮汐波从 W1 至 W2,向内陆推进 416 m,其潮汐效率下降 5%,时间滞后延长 0.2 h.W4 的潮汐效率低至 2%,相对于海潮波动的滞后时间可达 8 d.

2.4 近海地下水位与盐分的波动关系

根据 2.1~2.3 中结果,地下观测井 W1、W2 离海距离近,且具有类似海潮的频率和能量分布,潮汐效率较高,滞后时间较短,其地下水位对海潮有明显的水动力响应.将 W1 和 W2 地下水位、电导波动

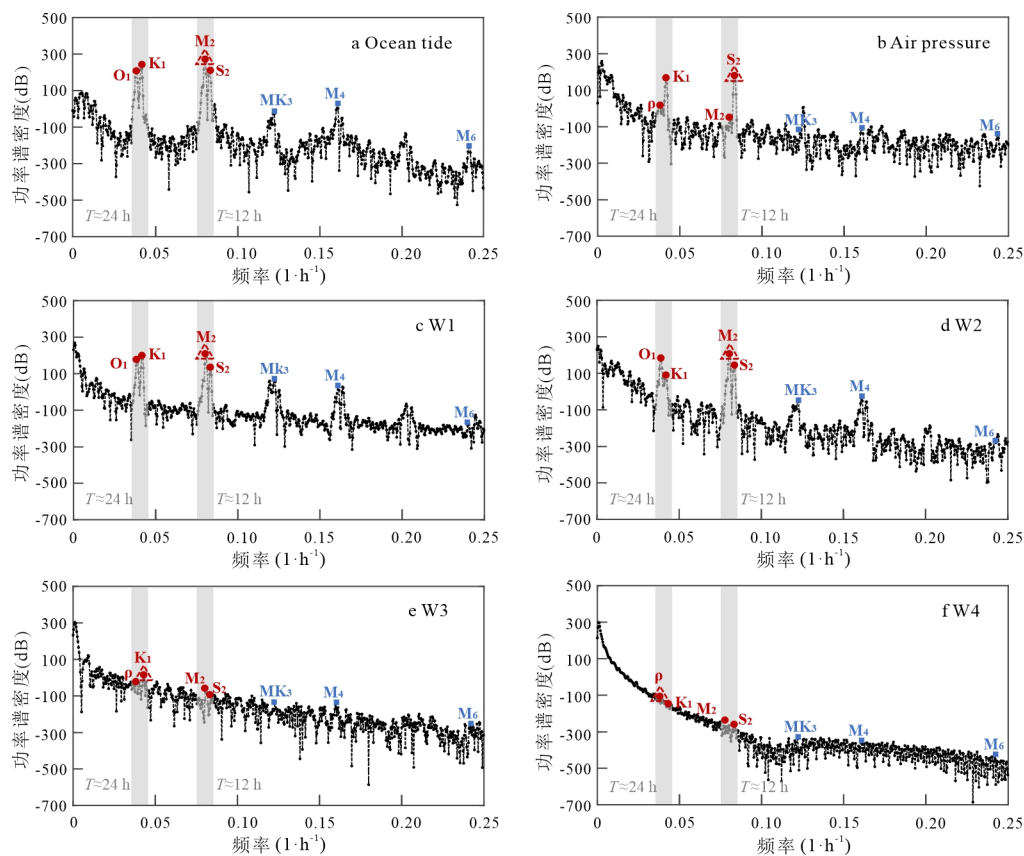


图3 地下水水位功率谱图

Fig.3 Power spectrum of groundwater level

a. 海潮水位; b. 当地气压; c ~ f. 地下观测井 W1 ~ W4 水位

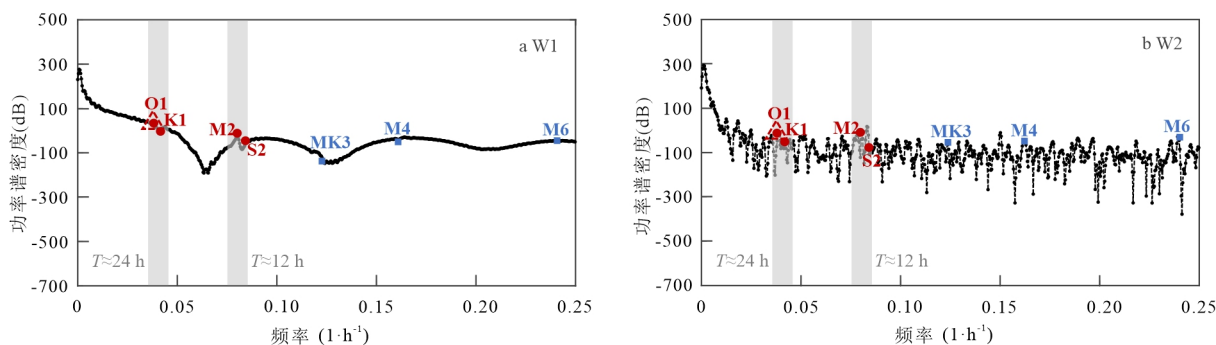


图4 地下水电导率功率谱图

Fig.4 Power spectrum of groundwater conductivity

a. W1 电导; b. W2 电导

中的高频和低频成分进行提取,分别从太阳日内 ($T < 24$ h)、朔望月 ($T < 30$ d) 两类不同的时间周期来分析地下水盐分对海潮的水动力响应。

2.4.1 太阳日周期波动 重构 W1、W2 日周期性波动序列,其地下水电导和水位波动相对于海潮水位均表现出时间滞后,且电导波动与海潮水位的相关程度偏低。将海潮水位序列作为输入项,观测井的水位、电导分别作为输出项,利

用互相关图分析海潮水位、地下水位、地下水电导的时间先后与相关性(图 5)。水体中电导可作为盐度的指示,由于水体中存在可溶性离子盐,其离子成分越多,电导率越高。

从图 5 观察到:(1)W2 中水位相对海潮滞后的时间为 0.6 h,表现极高相关($\widehat{r_{x,y}} = 0.97$),电导相对海潮滞后时间更长为 48.3 h,表现中度相关($\widehat{r_{x,y}} =$

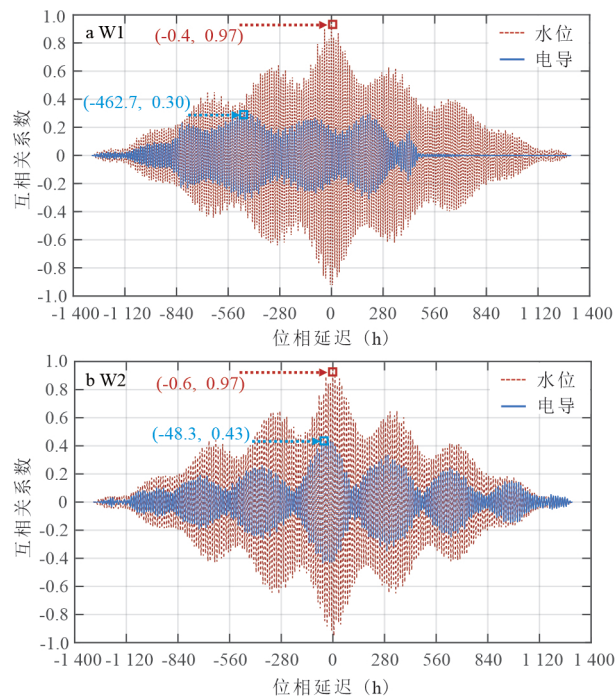


图5 地下水位和电导相对海潮水位的互相关

Fig.5 Cross-correlation plots of groundwater level and conductance relative to ocean tide level

a.W1; b.W2

0.43),二者时间差为 $48.3 - 0.6 = 47.7 \text{ h} \approx 2.0 \text{ d}$ 。(2) W1 水位与海潮的相关性极高 ($\widehat{r_{x,y}} = 0.97$),但其电导与海潮水位的相关性低 ($\widehat{r_{x,y}} = 0.30$),其相对于海水的滞后时间为 19 d. 体现出在同等传递范围下,潮汐能量传递到地下水盐分比水位的衰减更大,盐分的传输速率相比水压传递速率更低。

2.4.2 朔望月周期波动 在朔望月周期内, W1、W2 中水位、电导呈现类似海潮的波动形态, W1 中盐分远超过一般地下淡水, 2021 年 2 月 22 日至 3 月 12 日 W1、W2 水位和电导连续观测的波动变化如图 6 所示。从中观察到:(1) W1、W2 水位和电导呈现约 15 d 的波动周期,大潮期间的水位和电导潮差总体相对小潮期间更大。(2) 海水电导的波动范围为 $24.4 \sim 41.6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 平均值为 $35.0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, W1 的地下水电导的波动范围为 $18.0 \sim 18.6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 平均值为 $18.3 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 远超过正常地下淡水的电导 $1000 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 且约为海水电导的 52%。(3) W2 的地下水电导的波动范围为 $390.9 \sim 391.5 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 平均值为 $391.2 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。在此推测, W1 距海岸线最近, 其地下水动态可能易受到海水的长期影响, W2 地下水中可溶性离子盐总量基本稳定, 暂未受到海水影响。

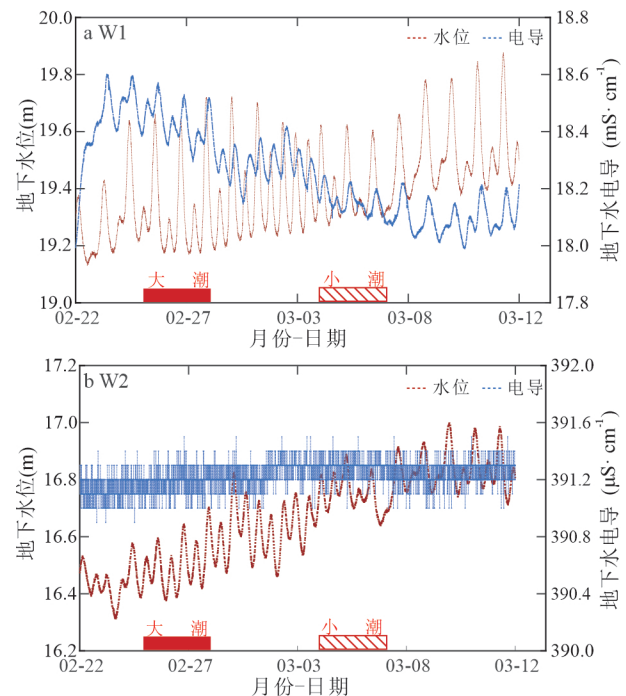


图6 朔望月周期内地下水位和电导的变化过程

Fig.6 Variation process of groundwater level and conductance during the synodic cycle

a.W1; b.W2

W1、W2 在潮汐作用下, 地下水盐分传输滞后于其地下水位波动, 且朔望月内的潮差变化会引起地下水盐分的传输变化。从大潮和小潮期间 W1、W2 的地下水电导相对其水位波动的互相关图(图 7)中观察到:(1) W1、W2 地下水盐分相对其水位波动的滞后范围为 $1.4 \sim 11.8 \text{ h}$, 且二者相关性在大小潮均较高 ($\widehat{r_{x,y}} > 0.7$), 远高于地下水盐分滞后于海潮波动的相关性 ($\widehat{r_{x,y}} < 0.5$), 说明潮汐对地下水位波动影响更大, 且地下水盐分的输送主要受到地下水位波动的影响。(2) W1 地下水盐分与其水位波动相关程度较高 ($\widehat{r_{st}} = 0.96$, $\widehat{r_{nt}} = 0.80$), W2 地下水盐分与其水位波动相关程度略弱于 W1 ($\widehat{r_{st}} = 0.91$, $\widehat{r_{nt}} = 0.72$)。(3) W1、W2 在大潮期间地下水盐分滞后于其水位波动的时间均比小潮期间更短, 分别提前 1.4 h 和 5.4 h , 且大潮期间地下水盐分与其水位的相关程度比小潮期间更高, 与前人研究发现由于大潮期间海水潮差达到最大, 地下水的水力梯度增加、区域的水力弥散作用增强, 海水盐分更容易传输到地下淡水中的结果一致 (Kim *et al.*, 2005; Guarracino *et al.*, 2012; Abarca *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2021)。

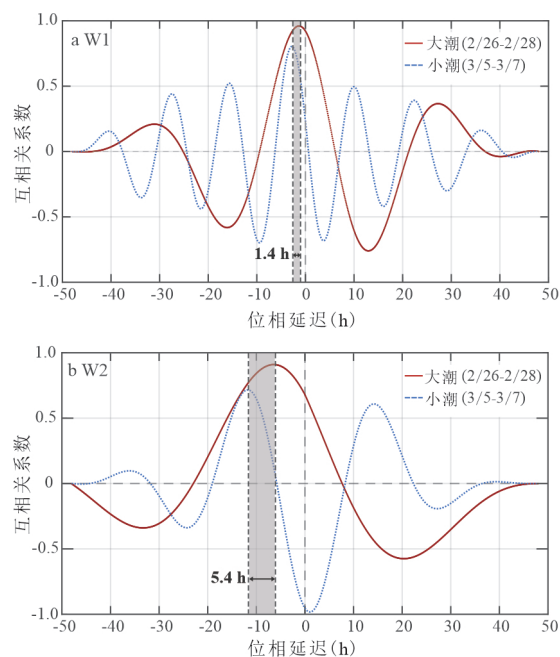


图7 朔望月周期内地下水电导和其水位波动的互相关图
Fig.7 Cross-correlation plots of groundwater conductance and its water level fluctuations during the synodic cycle
a. W1; b. W2

3 讨论

3.1 地下水位对海潮的响应

硃洲岛海潮对地下水位的水平影响范围约为400~500 m.当地下观测井距海岸线的水平距离不超过500 m,其水位的周期性波动明显,且水位功率谱的峰频分布类似海潮.前人研究发现,珠海市唐家镇海潮对浅层基岩裂隙水水位的影响可达1 000 m(付丛生等,2008),在黄河三角洲淤泥质海岸带,潮汐信号向浅层地下水传递的水平范围可达7 km(常茂祥等,2021).本文研究区地下水对海潮响应范围相对较小,可能因为火山岛沉积物或火山岩的低渗透性会导致海潮压力在向井水位传递过程中受到抑制作用更强(Rotzoll *et al.*, 2008; Poncela *et al.*, 2022).此外,由于潮汐能量在垂直方向上衰减更大,因此传递到浅层井后水位波动的能量相对深层井更弱(Bakker, 2019),W3地下水位对海潮的水动力响应较弱.东南侧砂质海岸(W2附近)地势高、潮差较大,其附近海域的潮汐信号相对西北侧淤泥质海滩(W1附近)更强,且其观测井的深度相比W1超过62 m,但因离海水平距离的限制,其地下水位对海潮的水动力响应略弱于W1.

3.2 含水层介质的影响

在海潮的水平影响范围内,含水层的颗粒越细、渗透性越低,观测井中水位波动的振幅衰减越大、位相延迟越长.根据原位抽水实验资料,采用承压水完整井公式求解W1~W3的渗透系数分别为1.98 m/d、2.95 m/d、1.75 m/d.依据图8的钻孔岩性情况,W3上覆25 m粘土层,且下方夹有仅13 m的粉砂-细砂含水层,W2含水层厚度为26 m,中砂占比15%,细砂占比85%,W1含水层厚度也为26 m,中砂占比55%,细砂占比45%,其颗粒大小排序为 $p_{w1} > p_{w2} > p_{w3}$.在承压井W1~W3中,W3含水层的颗粒最细、渗透性最低,因此潮汐信号在传递过程中受到阻尼、延缓作用较强,与前人研究中的规律一致(Carr and van Der Kamp, 1969; Wheatcraft and Buddemeier, 1981; Fadili *et al.*, 2016).

硃洲岛西北侧近海第四纪中砂层存在海水进入地下淡水的通道.W1地下水盐分已经明显受到海水的影响,附近1口民用水井深260 m,地下水中盐分含量低.第四系松散层、断裂破碎带、岩溶溶隙或溶洞等水文地质条件都可能造成地下水与海水的连通,从而打破地下水中盐分平衡(郭占荣和黄奕普,2003; Fadili *et al.*, 2016).相对于火山岛的承压含水层来说,珊瑚礁灰沙岛地下淡水主要漂浮于内渗海水之上的淡水透镜体中,上层淡水和下层海水因密度差异处于动力平衡状态,只要人为抽水时不将上层淡水抽走,其地下水中的盐分平衡便不会被打破(赵焕庭等,2014; Poncela *et al.*, 2022).而W2在海平面以下34 m处分布约30 m厚的玄武岩质层.中砂层位于海平面以下130 m,在中砂层和玄武岩质层之间夹有约44 m粘土层,其地下水与海水的连通性较弱,虽然其水质暂时不受海水的影响,但若未来地下水量开采过大导致附近含水层水量失衡,海水可能会影响其地下水中盐分含量.此外,W1中地下水盐分含量高导致海潮驱动其波动需要消耗较多能量,故其电导谱图主要峰频的能量不突出,波形呈现光滑山包状(图4a),同理可说明W2中地下水盐分含量处于正常范围,其对海潮的水动力响应略强于W1地下水盐分(图5).

4 结论

基于硃洲岛地下观测井W1~W4的水位波动趋势,采用功率谱图、小波分析、互相关等方法对地下水位、盐分波动特征进行联合分析,

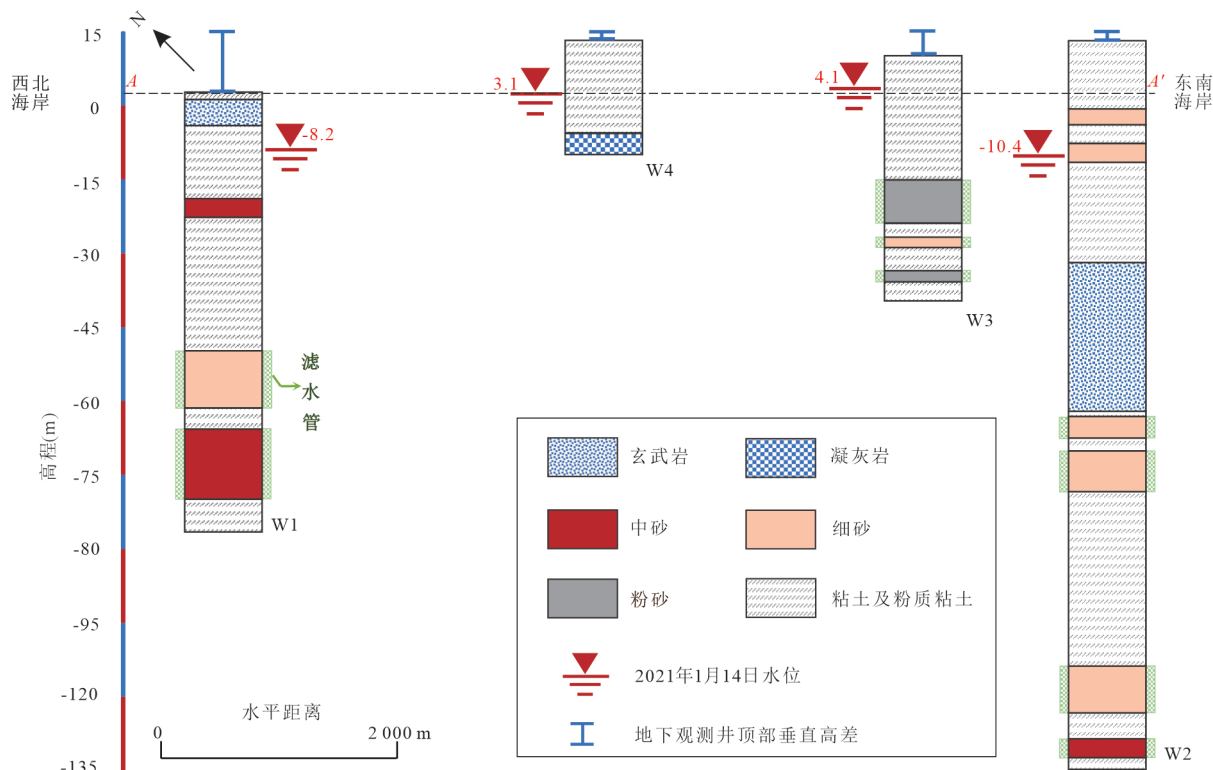


图8 W1~W4地下观测井岩性柱状图
Fig.8 Lithologic charts of wells W1-W4
以图1中A-A'为垂直投影面

得到的主要结果及结论如下：

- (1) 硇洲岛海潮对地下水位的水水平影响范围约为 400~500 m. 当地下观测井距海岸线的水平距离不超过 500 m, 其水位的周期性波动明显, 且水位功率谱的峰频分布类似海潮, 体现出附近海域以不规则半日潮为主的潮汐能量. 潮汐波从 W1 至 W2, 向内陆推进 416 m, 其潮汐效率下降 5%, 时间滞后延长 0.2 h.
- (2) 离海距离、含水层特性是影响地下水对海潮响应的主要因素. 在海潮的水平影响范围内, 含水层的颗粒越细、渗透性越低, 观测井中水位波动的振幅衰减越大、位相延迟越长. 此外, 观测井的深度、研究区的地形及潮差对潮汐力的传递也会存在干扰.
- (3) 硇洲岛西北侧近海第四纪中砂层存在海水进入地下淡水的通道. W1 明显受到海水的影响, 其地下水盐分为海水盐分的 52%, 当其对海潮的水动力响应好且与海水的连通性好, 海水中的盐分物质更易进入到地下淡水中.
- 通过地下水对海潮的响应可以识别海潮的影响范围, 从而为滨海地区地下淡水的管理提供有效的支持, 此外本文研究结果可为后续深入分析海岛

或近海地下水的咸化现象提供重要的水动力依据.

致谢: 广东省水文局湛江分局在野外调查过程中给予全力支持, 并提供硇洲岛讯地仔村水塔旁的监测井水文地质综合成果图. 广东省环境监测总站 在研究区基础水文地质资料获取中给予诸多帮助, 并提供硇洲岛黄屋村、加律新村、那宴村的统测水位监测孔综合成果图. 协助 2021 年 1 月~3 月硇洲岛野外调研的人员有: 梁作兵, 伍琪瑞, 田帝. 向以上给予本文支持和帮助的同行及同门表示感谢!

References

Abarca, E., Karam, H., Hemond, H. F., et al., 2013. Transient Groundwater Dynamics in a Coastal Aquifer: The Effects of Tides, the Lunar Cycle, and the Beach Profile. *Water Resources Research*, 49(5): 2473–2488. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20075>

Alcaraz, M., Carrera, J., Cuello, J., et al., 2021. Determining Hydraulic Connectivity of the Coastal Aquifer System of La Plata River Estuary (Argentina) to the Ocean by Analysis of Aquifer Response to Low-Frequency Tidal Components. *Hydrogeology Journal*, 29(4): 1587–1599.

Bakker, M., 2019. Analytic Solutions for Tidal Propagation

- in Multilayer Coastal Aquifers. *Water Resources Research*, 55(4): 3452—3464. <https://doi.org/10.1029/2019wr024757>
- Cao, J.F., Wu, R.Q., Xiao, Z.P., et al., 2014. Analysis of Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics of Groundwater in Naozhou Island. *Pearl River*, 35(5): 46—49 (in Chinese).
- Carr, P. A., van Der Kamp, G. S., 1969. Determining Aquifer Characteristics by the Tidal Method. *Water Resources Research*, 5(5): 1023—1031. <https://doi.org/10.1029/wr005i005p01023>
- Chang, M.X., Shi, J.H., Ye, S. Y., et al., 2021. Dynamic Characteristics and Causes of Shallow Groundwater Level Intra-Annual Changes in the Yellow River Delta. *Marine Sciences*, 45(10): 20—31 (in Chinese with English abstract).
- Cuello, J. E., Guarracino, L., 2020. Tide - Induced Head Fluctuations in Coastal Aquifers of Variable Thickness. *Hydrological Processes*, 34(21): 4139—4146. <https://doi.org/10.1002/hyp.13873>
- Doan, M.L., Brodsky, E.E., Prioul, R., et al., 2006. Tidal Analysis of Borehole Pressure: A Tutorial. University of California, Santa Cruz, 28—38.
- Dong, C.H., Gao, Z., Yu, X. H., 2004. The Principle and Application of Matlab Wavelet Analysis Toolbox. National Defense Industry Press, Beijing, 1—8 (in Chinese).
- Fadili, A., Malaurent, P., Najib, S., et al., 2016. Investigation of Groundwater Behavior in Response to Oceanic Tide and Hydrodynamic Assessment of Coastal Aquifers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(5): 290. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5287-2>
- Fang, Y. H., Zheng, T. Y., Zheng, X. L., et al., 2021. Influence of Tide-Induced Unstable Flow on Seawater Intrusion and Submarine Groundwater Discharge. *Water Resources Research*, 57(4): e2020WR029038. <https://doi.org/10.1029/2020wr029038>
- Fu, C.S., Chen, J.Y., Zeng, S.Q., et al., 2008. Statistical Analysis on Impact of Tide on Water Table Fluctuation in Coastal Aquifer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39(12): 1365—1376 (in Chinese with English abstract).
- Guarracino, L., Carrera, J., Vázquez-Suñé, E., 2012. Analytical Study of Hydraulic and Mechanical Effects on Tide - Induced Head Fluctuation in a Coastal Aquifer System That Extends under the Sea. *Journal of Hydrology*, 450: 150—158. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.015>
- Guo, Z.R., Huang, Y.P., 2003. Comprehensive Study on Seawater Intrusion. *Hydrology*, 23(3): 10—15 (in Chinese with English abstract).
- He, P., 2016. Power Spectrum Estimation Basics. China Meteorological Press, Beijing, 96—97 (in Chinese).
- Huang, J. O., Xian, Y., Li, W., et al., 2021. Hydrogeochemical Evolution of Groundwater Flow System in the Typical Coastal Plain: A Case Study of Hangjiahu Plain. *Earth Science*, 46(7): 2565—2582 (in Chinese with English abstract).
- Kim, J. H., Lee, J., Cheong, T. J., et al., 2005. Use of Time Series Analysis for the Identification of Tidal Effect on Groundwater in the Coastal Area of Kimje, Korea. *Journal of Hydrology*, 300(1/2/3/4): 188—198. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.004>
- Li, Y., Wang, J.L., Jin, M.G., et al., 2021. Hydrodynamic Characteristics of Jinan Karst Spring System Identified by Hydrologic Time-Series Data. *Earth Science*, 46(7): 2583—2593 (in Chinese with English abstract).
- Lovrinović, I., Srzić, V., Matić, I., et al., 2022. Combined Multilevel Monitoring and Wavelet Transform Analysis Approach for the Inspection of Ground and Surface Water Dynamics in Shallow Coastal Aquifer. *Water*, 14(4): 656. <https://doi.org/10.3390/w14040656>
- Luo, W. Y., 2020. Evaluation and Strategies of Development and Utilization of Groundwater Resources in Naozhou Island, Zhanjiang City. *Ground Water*, 42(5): 95—98 (in Chinese).
- Luo, Z.J., Wang, X., Dai, J., et al., 2024. Research on the Influence of Land Subsidence on the Minable Groundwater Resources. *Earth Science*, 49(1): 238—252 (in Chinese with English abstract).
- Mallat, S. G., 1989. Multiresolution Approximations and Wavelet Orthonormal Bases of $L^2(\mathbb{R})$. *Transactions of the American Mathematical Society*, 315(1): 69—87. <https://doi.org/10.2307/2001373>
- McMillan, T. C., Rau, G. C., Timms, W. A., et al., 2019. Utilizing the Impact of Earth and Atmospheric Tides on Groundwater Systems: A Review Reveals the Future Potential. *Reviews of Geophysics*, 57(2): 281—315. <https://doi.org/10.1029/2018rg000630>
- Poncela, R., Santamarta, J. C., García - Gil, A., et al., 2022. Hydrogeological Characterization of Heterogeneous Volcanic Aquifers in the Canary Islands Using Recession Analysis of Deep Water Gallery Discharge. *Journal of Hydrology*, 610: 127975. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127975>
- Purnomo, A. D., Marfai, M. A., Husrin, S., 2021. Identifying the Effect of Tides on Groundwater Level Fluctuations on Gili Ketapang Island, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 595: 322—332. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.322332>

- nal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 29(3): 215–228. <https://doi.org/10.3846/jeeim.2021.14618>
- Rizzo, C. B., Song, X. H., de Barros, F. P. J., et al., 2020. Temporal Flow Variations Interact with Spatial Physical Heterogeneity to Impact Solute Transport in Managed River Corridors. *Journal of Contaminant Hydrology*, 235: 103713. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103713>
- Robinson, C., Gibbes, B., Carey, H., et al., 2007. Salt-Freshwater Dynamics in a Subterranean Estuary over a Spring-Neap Tidal Cycle. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C9): 2006JC003888. <https://doi.org/10.1029/2006jc003888>
- Rotzoll, K., El-Kadi, A. I., Gingerich, S. B., 2008. Analysis of an Unconfined Aquifer Subject to Asynchronous Dual-Tide Propagation. *Groundwater*, 46(2): 239–250. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00412.x>
- Sheng, C., Han, D. M., Xu, H. H., et al., 2020. Evaluating Dynamic Mechanisms and Formation Process of Freshwater Lenses on Reclaimed Atoll Islands in the South China Sea. *Journal of Hydrology*, 584: 124641. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124641>
- Su, Z. H., 1997. Development and Utilization Protection Strategies of Groundwater against Seawater Intrusion in Zhanjiang City. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2: 29–33 (in Chinese).
- Trefry, M. G., Bekele, E., 2004. Structural Characterization of an Island Aquifer via Tidal Methods. *Water Resources Research*, 40(1): 2003WR002003. <https://doi.org/10.1029/2003wr002003>
- Trglavcnik, V., Morrow, D., Weber, K. P., et al., 2018. Analysis of Tide and Offshore Storm-Induced Water Table Fluctuations for Structural Characterization of a Coastal Island Aquifer. *Water Resources Research*, 54(4): 2749–2767. <https://doi.org/10.1002/2017wr020975>
- Wheatcraft, S. W., Buddemeier, R. W., 1981. Atoll Island Hydrology. *Groundwater*, 19(3): 311–320. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1981.tb03476.x>
- Zhang, H., 2021. Characterization of a Multi-Layer Karst Aquifer through Analysis of Tidal Fluctuation. *Journal of Hydrology*, 601: 126677. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126677>
- Zhao, H. T., 1988. Natural Environmental Analyses of the South China Coastal Zone. *Tropic Oceanology*, 7(4): 36–45 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. T., Wang, L. R., Song, Z. J., 2014. Review on Freshwater Lens of Lime-Sand Island in Nanhai Zhudao. *Marine Science Bulletin*, 33(6): 601–610 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, W. Q., 2017. Research on Numerical Modeling and Prediction of Seawater Intrusion in Naozhou Island. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 14(3): 371–378 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. R., Zhang, J., Wu, R. S., 2012. Tidal Analysis along the Coast of the Northern South China Sea. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 31(4): 549–556 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 曹基富, 吴瑞钦, 肖子平, 等, 2014. 硇洲岛地下水氢氧同位素特征分析. 人民珠江, 35(5): 46–49.
- 常茂祥, 史经昊, 叶思源, 等, 2021. 黄河三角洲浅层地下水位年内变化特征及影响因素. 海洋科学, 45(10): 20–31.
- 董长虹, 高志, 余啸海, 2004. Matlab小波分析工具箱原理与应用. 北京: 国防工业出版社, 1–8.
- 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等, 2008. 滨海地区潮汐对地下水位变化影响的统计学分析. 水利学报, 39(12): 1365–1376.
- 郭占荣, 黄奕普, 2003. 海水入侵问题研究综述. 水文, 23(3): 10–15.
- 何平, 2016. 功率谱估计基础. 北京: 气象出版社, 96–97.
- 黄金瓿, 鲜阳, 黎伟, 等, 2021. 典型滨海平原区地下水流系统水化学场演化及成因: 以杭嘉湖平原为例. 地球科学, 46(7): 2565–2582.
- 李严, 王家乐, 靳孟贵, 等, 2021. 运用水文时间序列分析识别济南泉域岩溶发育特征. 地球科学, 46(7): 2583–2593.
- 罗炜宇, 2020. 湛江市硇洲岛地下水资源评价及开发利用对策研究. 地下水, 42(5): 95–98.
- 骆祖江, 王鑫, 代敬, 等, 2024. 地面沉降对地下水可采资源的影响. 地球科学, 49(1): 238–252.
- 苏肇汉, 1997. 湛江市地下水防海水入侵的开发利用保护对策. 工程勘察, 2: 29–33.
- 赵焕庭, 1988. 华南海岸带自然环境分析. 热带海洋, 7(4): 36–45.
- 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景, 2014. 南海诸岛灰沙岛淡水透镜体研究述评. 海洋通报, 33(6): 601–610.
- 郑王琼, 2017. 硇洲岛三维海水入侵数值模拟及预测研究. 工程地球物理学报, 14(3): 371–378.
- 郑有任, 张娟, 吴日升, 2012. 南海北部沿岸海域潮汐的调和分析. 台湾海峡, 31(4): 549–556.