

李宁,郭秀军,马强伟,等.海底承压含水层排泄电阻率法探测效果模拟与分析[J].海洋学报,2019,41(5):128-137,doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.05.012

Li Ning, Guo Xiujun, Ma Qiangwei, et al. The research of electrical resistivity system's application effect simulation in coastal submarine confined groundwater discharge[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(5):128-137, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.05.012

海底承压含水层排泄电阻率法 探测效果模拟与分析

李宁¹,郭秀军^{1,2*},马强伟¹,张宇丰¹

(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)

摘要:海底承压含水层排泄是海底地下水排泄的一种主要形式。由于这一过程发生在海水层下部,探测难度较大。为探讨海洋多电极电阻率法对该过程的探测能力,根据典型海底承压含水层地质模型构建不同排泄阶段地电模型,模拟海面和海床面两种探测情形分别进行多电极电阻率法理论探测结果计算和物理模拟,并对所得电阻率剖面进行对比分析。研究表明,水面多电极电阻率探测剖面能够清晰刻画出排泄入海的淡水体在海水中迁移、混合过程,但剖面异常特征和分辨率受探测装置形式、电极极距、海水深度影响;海床面探测则对沉积层中咸淡水交换过程反映能力更强,沉积层中的楔形海水侵入体可得到良好反映。

关键词:海底地下水排泄;承压含水层;电阻率法;探测效果

中图分类号:P642.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4193(2019)05-0128-10

1 引言

20 世纪六七十年代,科学家逐渐认识到海底地下水排泄(Submarine Groundwater Discharge, SGD)是陆源物质输向海洋的主要途径,进而影响到整个海洋生态系统^[1-3]。20 世纪 90 年代末至今,该问题的研究逐步成为海岸带水环境研究的热点问题^[4-8]。研究认为海底地下水排泄主要包括潜水层排泄和承压含水层排泄两种形式,前者主要发生在海岸带地区,后者则发生在更深海域(图 1)^[8-9]。

当前对海底地下水排泄过程的监测研究主要针对对潜水含水层排泄开展。监测方法主要包括直接测量法和同位素示踪法^[10-11]。直接测量法是将渗流仪

布设在海床面上,测量表面渗水速率和渗流量^[12]。测量数据只能反映布设点位置,大范围监测需要布设多台仪器,费时费力。示踪法常用镭和氦及其同位素,主要利用元素质量平衡模型来估算一定范围内的 SGD 总量^[13-14]。该方法的端元(比如地下水、外海海水)选取对评价结果影响很大,计算结果具有较大的不确定性。

依托咸、淡水体与周围土体电性差异实现的电阻率测量技术是 21 世纪初发展起来的一种新型监测方法。相比其他方法,电阻率法具有连续性、空间性、成图直观的优点,既可用于局部监测,也可用于大范围探测。应用初期常作为对比方法,与温度传感、示踪法相结合来监测地下水排泄过程^[15]。经 Henderson

收稿日期:2018-06-26;修订日期:2018-11-11。

基金项目:国家自然科学基金(41772307);国家重点研发项目(2017YFC0307701);国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(41427803)。

作者简介:李宁(1993—),男,山东省曹县人,主要从事海洋电法探测研究。E-mail:liningkkkkk@163.com

* 通信作者:郭秀军,教授,主要从事海洋工程地质环境监测技术教学和科研工作。E-mail:guojunqd@ouc.edu.cn

等^[16]、Dimoca 等^[17] 和 Johnson 等^[18] 学者的发展应用后,电阻率法逐步显示出其在水体运移实时反映、转换界面识别、局部排泄量估算等方面的技术优势和应用潜力,得到越来越多的应用。但从当前应用的实例来看,该方法还主要用于潮汐过程潜水含水层的排泄监测,针对较深水域承压含水层排泄过程的探测不

多见。

本文以较深水域承压含水层排泄为探测目标,建立相应地电模型,通过数值计算和物理模拟实验的方法,研究利用多电极电阻率系统分别在水面和海床面探测时得到的典型电阻率剖面异常特征及影响因素,评判该方法探测能力。

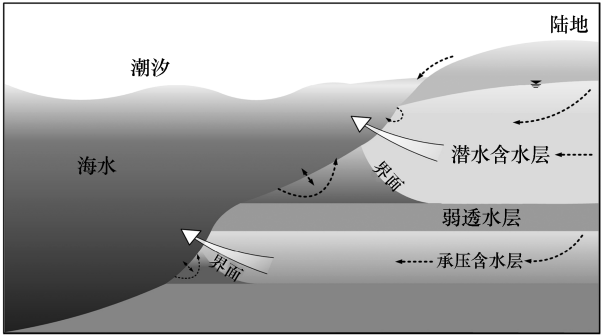


图 1 海底地下水排泄示意图

Fig.1 Submarine groundwater discharge schematic

2 海洋电阻率法探测系统

海洋电阻率法探测系统根据应用需求不同可进行不同的设计。以长期监测为应用需求的电学探测系统可由主控站、水面电极系、水下电极系及其他配件构成。主控站布置于岸边,包括采集仪、蓄电池及数据远程传输设备,实现数据定时采集及远程传输功

能。电极系由电极缆、持力缆及其他配件构成,水面电极系主要监测淡水排海后与海水混合扩散过程,水下电极系主要监测沉积层中咸淡水交换过程,系统构成如图 2 所示。电极缆上的电极材料应具有耐腐蚀、弱极化等特征,可选用铅、石墨及其他合金材料制作,电极间距视监测需求而定。系统采取恒流供电方式,供电电流应大于 5 A。数据采集通常选用偶极装置。

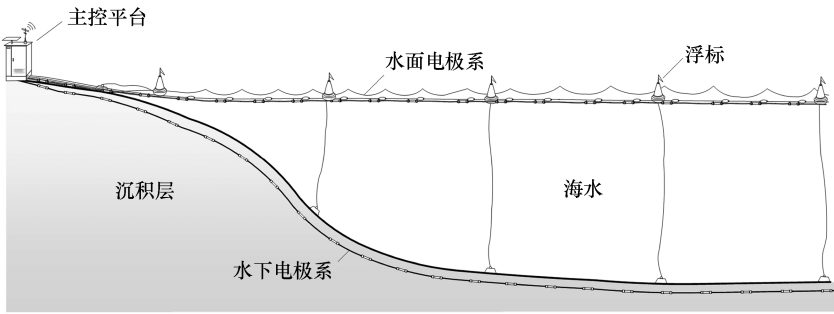


图 2 海岸带咸淡水交换过程多电极电阻率监测系统构成及布设

Fig.2 Multichannel electrical resistivity system's design concept and layout in coastal groundwater discharge

以快速调查为目标的海洋电阻率探测系统可采用水面走航式和水下走航式探测,区别在于电极所处水体位置^[19]。水面走航式电极漂浮于水面;水下走航式电极一般布设于水土界面或距离水底一定距离的位置,需要定位装置调节电极排状态。探测时,拖

船以一定速率(2.5~4 n mile/h)拖动漂浮电极前行,同步测得地层电流、电压等数据,计算得到电阻率(图 3)。虽然两种探测系统数据采集方式不同,但探测剖面构成相同,对同一目标体具有相同的探测异常特征。

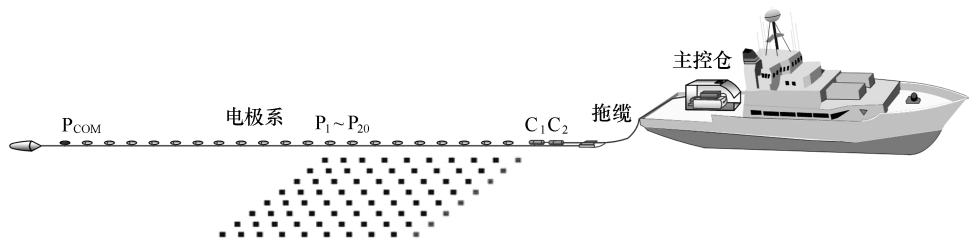


图 3 走航式多道电阻率探测系统

Fig.3 Navigated multichannel electrical resistivity system

3 数值模拟与分析

3.1 模型构建与数值计算

根据图 1 中承压含水层水文地质过程特征建立地电模型,并假设:(1)含水层均质,各向同性;(2)除排泄侵入带外其他区域不发生水体交换;(3)地下水流向、海水侵入方向垂直于含水层边界面。模型中地下水排泄过程分为 4 个阶段:a.背景阶段,淡水未从泄露口涌出;b.第二阶段,承压含水层淡水排出,由于补偿作用,较高密度海水从下方涌入含水层;c.第三阶段,由于密度差的影响,淡水排泄至海水上层,海水侵

入含水层范围不断扩大,同时发生咸淡水的混合,混合接触带不断扩大;d.第四阶段,排泄至海水表层的淡水向两侧不断扩散,淡水区域、海水侵入区域、混合接触带都不断发展。各阶段模型电阻率依据美国东海岸德玛瓦半岛海湾地下水排泄电阻率法观测实例及取样资料进行设置^[20],根据原位探测结果,海水电阻率设置为 $0.3 \Omega \cdot m$,承压淡水排泄区域电阻率设置为 $15 \Omega \cdot m$,其中混合接触带电阻率值根据界面两边电阻率值变化进行线性插值,最大水深设为 30 m,渗漏点水深设为 15 m 左右,如图 4 所示。正、反演计算均采用 RES 2D 软件实现。

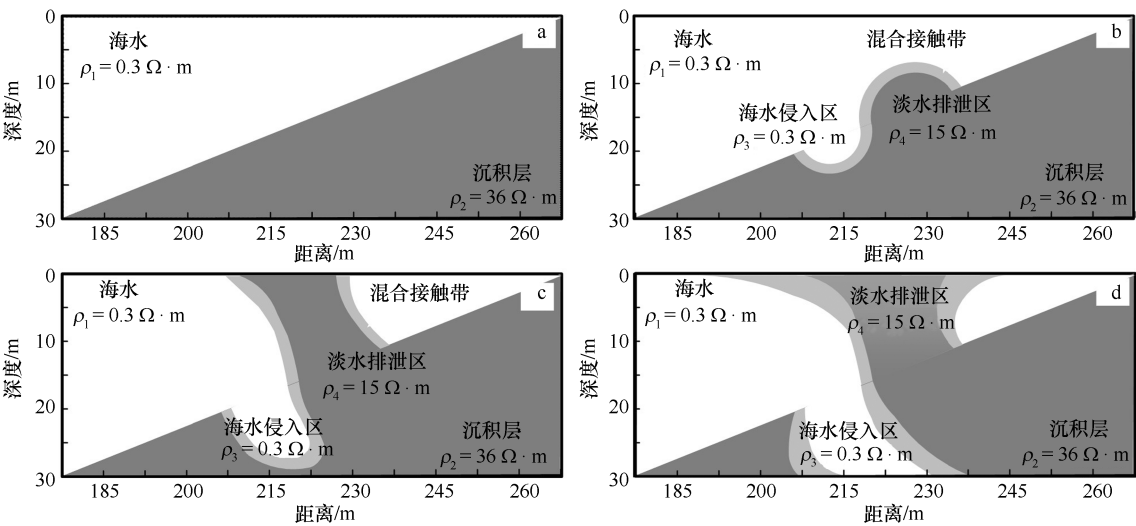


图 4 海底承压含水层排泄地电模型

Fig.4 Earth-electricity model of confined groundwater discharge

3.2 数值计算结果分析

3.2.1 水面电极系理论探测结果

针对图 4 所示的地电模型模拟利用极距 5 m、电极数 71 个的水面电极系进行探测,此时,水面电极系极距约为海水中淡水体最小横向宽度的 1/2。探测

采用偶极装置,数据采集层数为 48,相应理论探测剖面如图 5 所示。从图 5 可以看到海水中的淡水区表现为明显的高阻异常,异常区大小和淡水区尺寸具有对应关系。对沉积层中海水侵入区的反映较差,只在 d 阶段有可识别的异常反映。

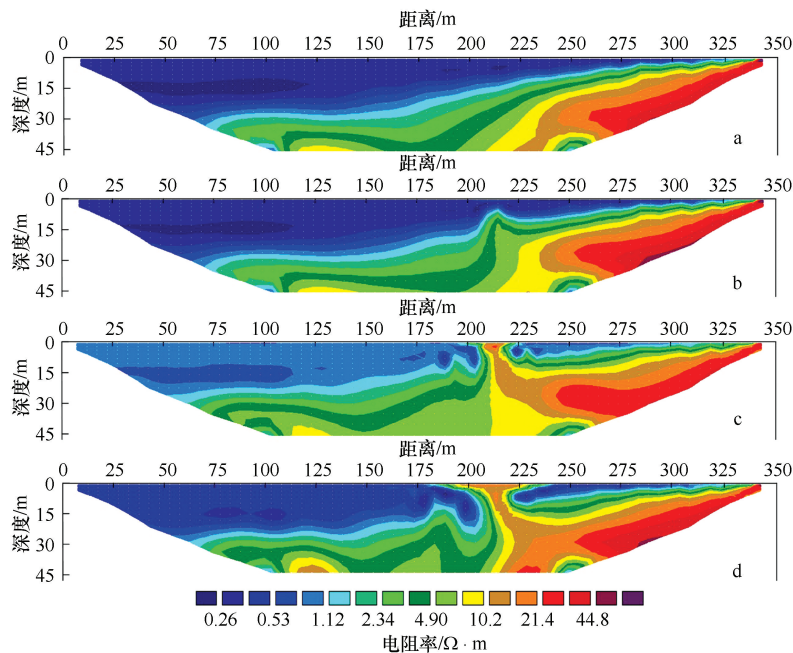


图 5 5 m 极距水面偶极装置探测理论剖面

Fig.5 Theoretical resistivity profile of dipole-dipole array while unit electrode spacing is 5 m

a, b, c, d 分别对应图 4 中 a, b, c, d 阶段

a, b, c, d correspond to the Fig.4 a, b, c, d, respectively

3.2.2 水面探测效果影响因素分析

(1)装置形式的影响

为对比不同装置探测剖面特征的差异性,保持水面电极系设置不变,采用施伦贝格装置对图 4 所示模

型进行探测,探测结果如图 6 所示。从图中可以看到,该装置探测剖面同样可清晰地反映出排泄到海水中的淡水体扩散过程,并具有和偶极装置探测剖面相似的特征,但对沉积层中海水侵入范围的反映能力不足。

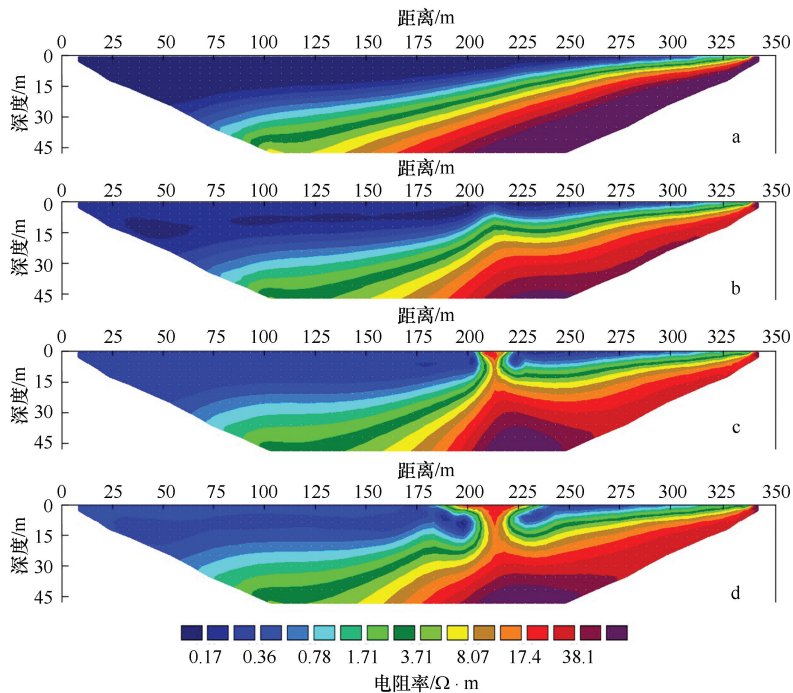


图 6 水面施伦贝格装置探测理论剖面

Fig.6 Theoretical resistivity profile of schlumberger array

(2)水深的影

减半模型渗漏点水深,同比例缩小排泄与侵入深度,控制其他采集条件与图 5 模拟相同,得到理论探

测剖面如图 7 所示,图中显示出水深变浅后探测剖面更能清晰的反映出淡水体分布和沉积层中海水入侵通道。

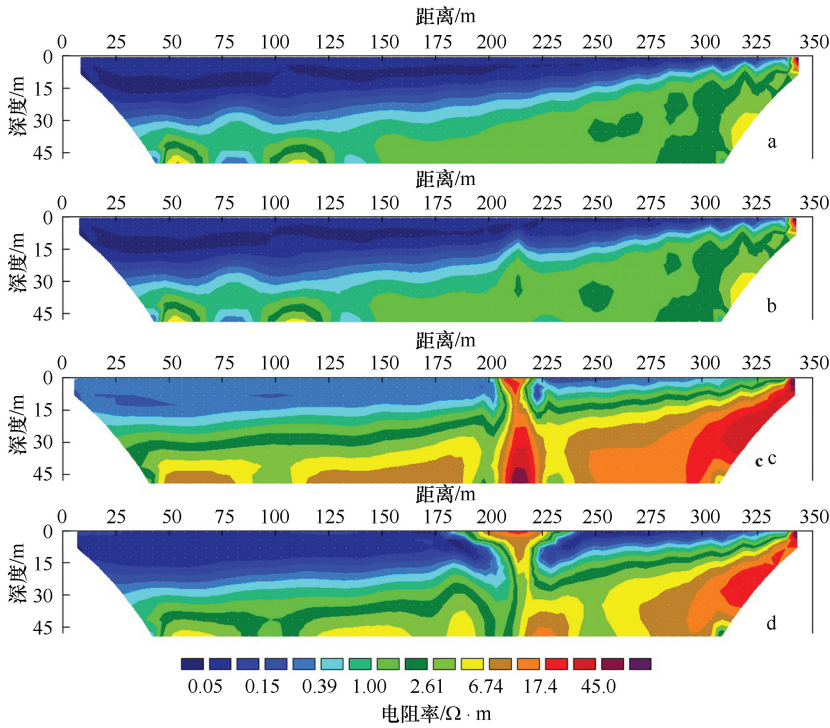


图 7 渗漏点水深 7.5 m 时水面偶极装置探测理论剖面

Fig.7 Theoretical resistivity profile of dipole-dipole array while discharging area depth is 7.5 m

(3)极距的影响

图 8 为利用极距为 10 m,电极数为 36 的水面电极系偶极装置探测理论剖面,采集数据层数为 20。此时,水面电极系极距与海水中淡水体最小横向宽度相当。探测图像对 b 阶段淡水刚发生渗漏时的探测能力减弱,但仍能反映淡水体在海水中的扩散过程。该极距下水面电极系对海水在沉积层中的扩散过程不具有反映能力。

3.2.3 多点渗漏情况

实际咸淡水交换过程会存在多点渗漏情况,建模时将图 4 所示模型的渗漏点增加至 2 个,渗漏点间距设置为 5 m,其他模型参数不变。模拟得到极距 5 m、电极数 71 个的水面偶极装置理论剖面如图 9 所示。从图中可以看出,渗漏到海水中的淡水体表现为两个孤立的高阻异常区。探测剖面能反映出两个渗漏点淡水排泄入海的空间分布,但不能分辨沉积层中海水入侵范围。

3.2.4 水下电极系探测

为探测沉积层中海水入侵范围,将电极系布设在

海床面上,同样利用偶极装置进行探测,所得剖面如图 10 所示,探测剖面可清晰的反映出 2 个渗漏点位置侵入海水的分布形态。

4 物理模拟与分析

4.1 实验设计

将 2 mm 筛网筛分后的砂土装填在 2 m×1.5 m×1.3 m 的有机玻璃水槽中形成斜坡,坡度设置为 17°。在坡面上布设 19 极电极系,极距 0.1 m,全长 1.8 m;然后在坡面上铺设防渗膜,并在其上部空间注入海水素配比的盐度 35 海水,完成后在砂层中注入淡水,使初始淡水水位面高于海水面,水位面高度通过设置在槽壁上的水位标尺确定。最后在海水面上布置 14 极电极系,极距 0.1 m,全长 1.3 m,具体电极的位置关系见图 11。装置布设完成后,各电极通过引线 with 电极开关相连,接入 Geopen 公司生产的 E60 型分布式高密度电阻率仪。

实验开始后,在防渗膜中部制造直径约 4 cm 的

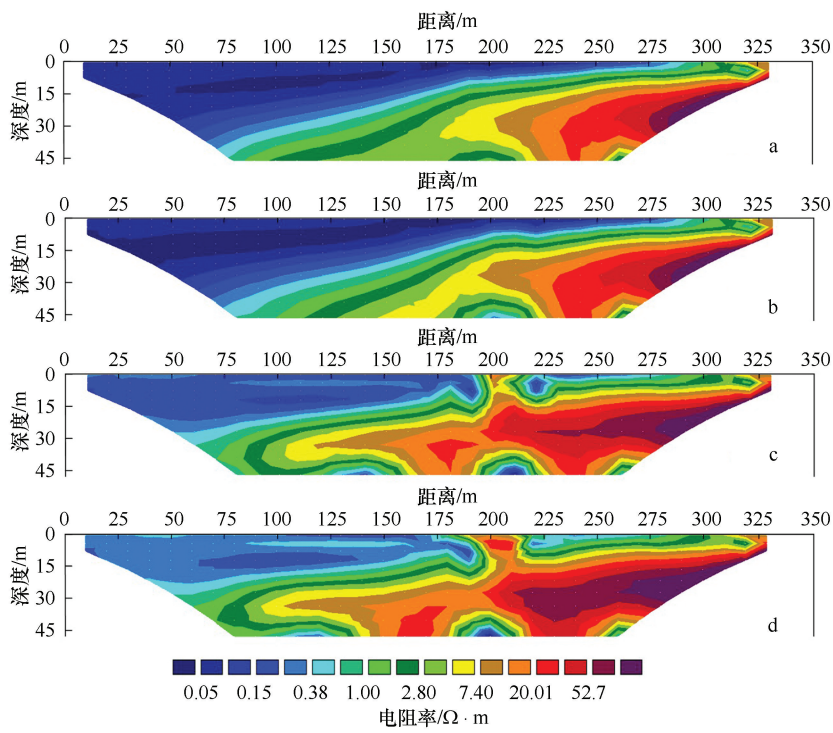


图 8 10 m 极距水面偶极装置探测理论剖面

Fig.8 Theoretical resistivity profile of dipole-dipole array while unit electrode spacing is 10 m

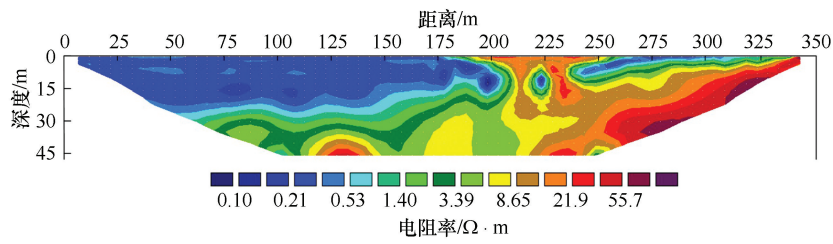


图 9 两点渗漏情况下水面电极系偶极装置探测理论剖面

Fig.9 Theoretical resistivity profile of dipole-dipole array while setting the number of discharging areas to 2

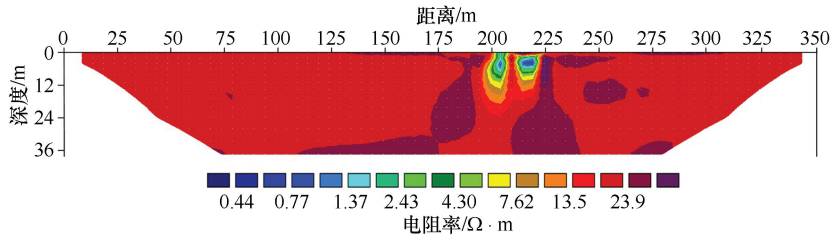


图 10 两点渗漏情况下水下电极系偶极装置探测理论剖面

Fig.10 Theoretical resistivity profile of underwater dipole-dipole array while setting the number of discharging areas to 2

渗漏点,由于水头差异,砂层中淡水通过渗漏点向海水中扩散,同时海水也可以通过渗入过程的物质补偿进入砂层中。在此过程中分别利用海水面和斜坡表层布设的水面、水下电极系进行连续电阻率剖面探

测。采集装置为偶极装置,恒流供电,水面采集数据 11 层,水下采集数据 16 层。采集数据经高斯低通滤波方法处理后,再利用 RES2dinv 软件进行反演处理,反演过程控制迭代均方根误差小于 5%。

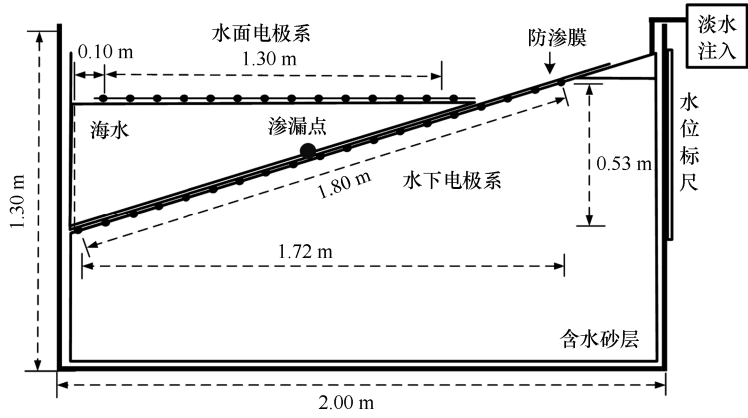


图 11 水槽实验装置设计
Fig.11 Indoor simulation flume experiment

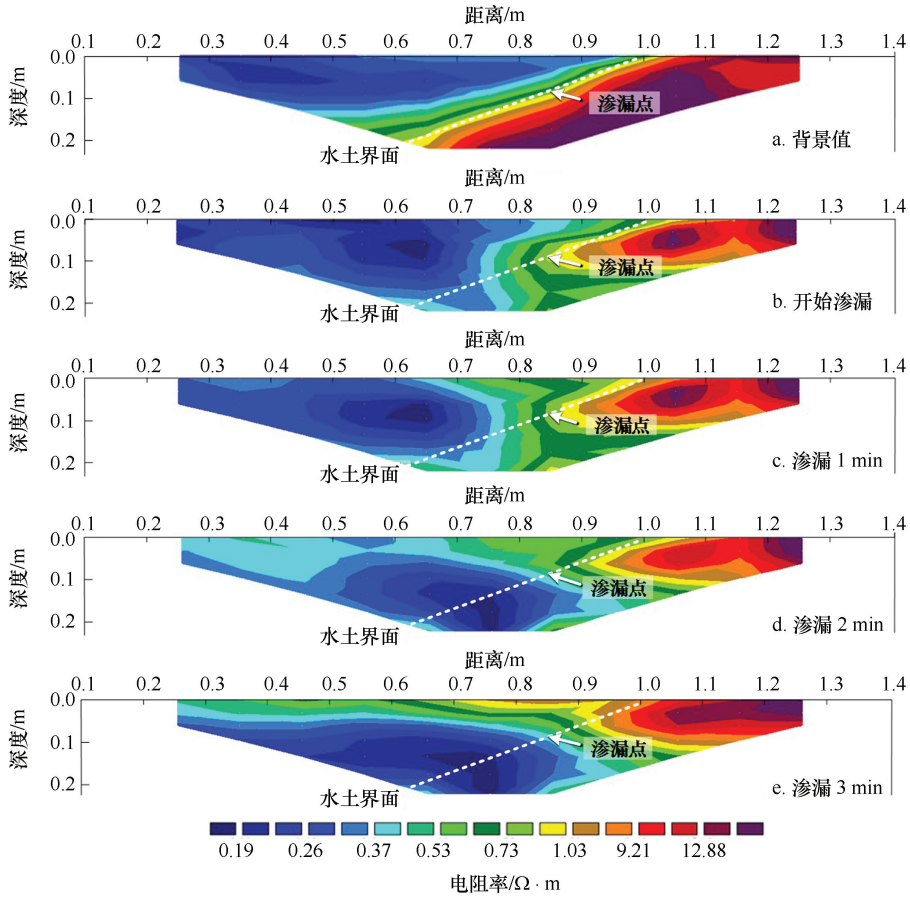


图 12 淡水渗漏过程水面电极系探测电阻率剖面

Fig.12 Measured dipole-dipole resistivity profile of freshwater discharge process while electrode array on the water

4.2 实验结果分析

图 12 为淡水渗漏过程水面电极系实测剖面。从图中可以看到,未发生渗漏时,海水视电阻率在 $0.2 \sim 0.3 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,砂层视电阻率在 $11 \sim 14 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,水土界面清晰(图 12a);渗漏发生后,由于海水向

砂层中侵入,渗漏点下侧砂土电阻率变成低阻异常区,同时渗漏的淡水和海水混合使海水层右侧电阻率升高(图 12b);随着渗漏持续发生,扩散到海水表层的淡水不断混合扩散至两侧,在海水表层形成一层明显的咸淡水混合层,混合层视电阻率在 $0.4 \sim 0.8 \Omega \cdot \text{m}$

之间(图 12c,图 12d,图 12e)。同时随着侵入到砂层中的海水不断扩散,低阻区分布范围也越来越大。对比不同时刻低阻区变化可确定砂层中海水界面横向扩散过程,但对底界面的刻画并不清晰。

图 13 为渗漏过程水下电极系实测剖面。从图中可以看到,砂层初始电阻率并不均匀(图 13a);随着海

水侵入,渗漏点位置首先表现为低阻异常(图 13b);随着海水持续侵入,低阻区首先横向扩展(图 13c),然后再沿坡面向深度方向扩展(图 13d),同时分布范围不断扩大(图 13e);以上监测剖面清晰的刻画了海水侵入砂层后的扩散过程。

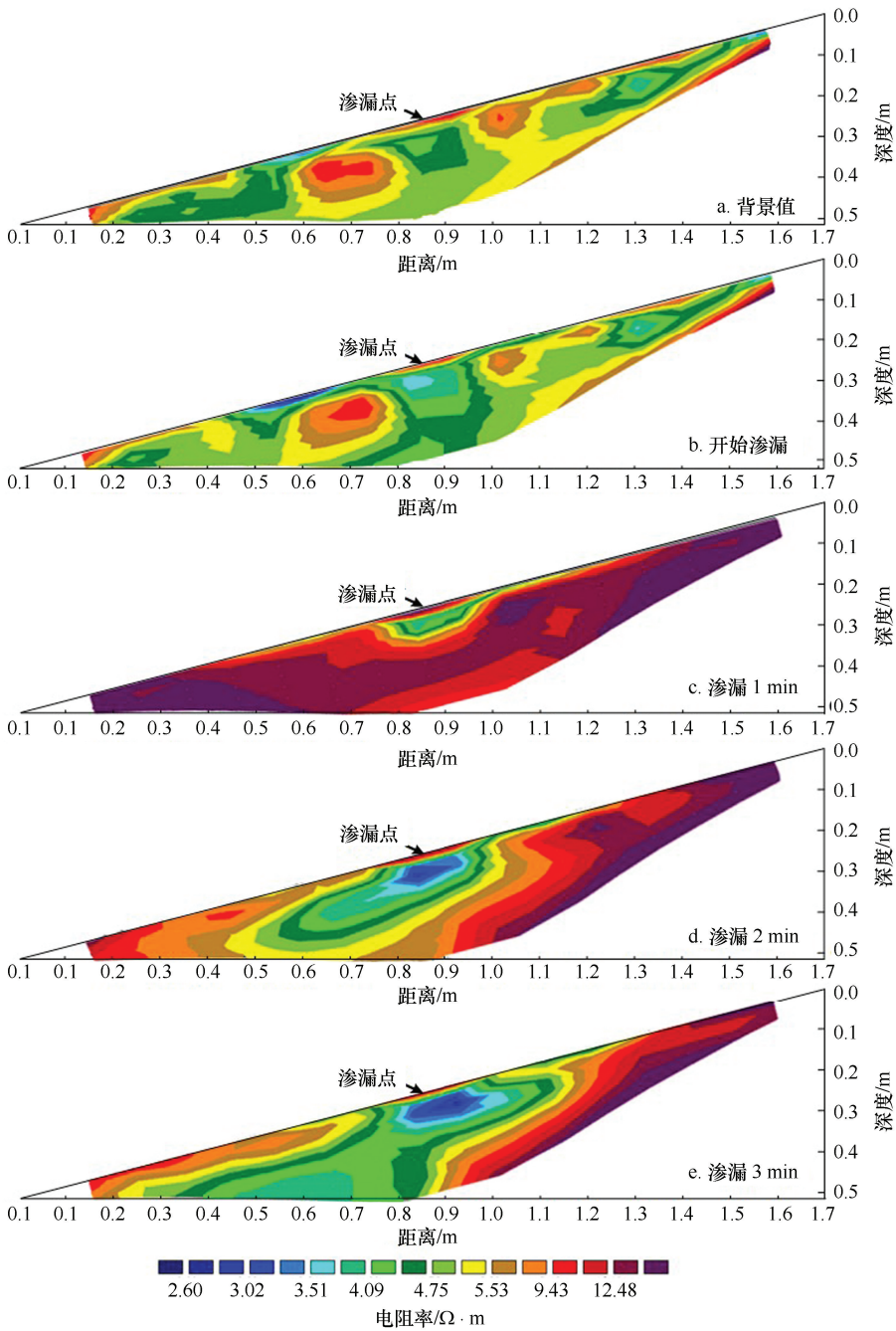


图 13 淡水渗漏过程水下电极系探测电阻率剖面

Fig.13 Measured dipole-dipole resistivity profile of freshwater discharge process while electrode array on the seabed

5 结论

(1)数值模拟结果显示当海水深度小于 30 m 时,水面多电极电阻率法可清晰探测到海底渗漏点分布位置。进入海水中的淡水体和探测剖面中的高阻区具有对应关系。对比不同时段探测剖面能够分析淡水体在海水中的迁移扩散规律。这种探测能力在小尺度物理模拟中也得到验证。

(2)水面电阻率法探测结果受探测装置形式、极

距、水深综合影响。施龙贝格和偶极装置都是可用的探测装置,电极距越大,海水越深都会降低探测剖面分辨率。

(3)数值计算和物理模拟实验都证实水面探测方式不能有效探测海底沉积层中咸淡水交换情况。只有在海床面上实施的探测才能有效反映实现这一目标。对比不同时刻海床面探测剖面能够分析海水在沉积层中的扩散规律。

参考文献:

- [1] Hanshaw B B, Back W, Deike R G. A geochemical hypothesis for dolomitization by ground water[J]. *Economic Geology*, 1971, 66(5): 710—724.
- [2] Badiozamani K. The Dorag dolomitization model—application to the middle Ordovician of Wisconsin[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1973, 43(4): 965—984.
- [3] Johannes R E. The ecological significance of the submarine discharge of groundwater[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1980, 3: 365—373.
- [4] Moore W S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments[J]. *Nature*, 1996, 380(6575): 612—614.
- [5] Lambert M J, Burnett W C. Submarine groundwater discharge estimates at a Florida coastal site based on continuous radon measurements[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66(1/2): 55—73.
- [6] Burnett W C, Bokuniewicz H, Huettel M, et al. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66(1/2): 3—33.
- [7] Moore W S. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2010, 2: 59—88.
- [8] Li Hailong, Jiao J. Quantifying tidal contribution to submarine groundwater discharges: a review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(25): 3053—3059.
- [9] 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.
- [10] Lee D R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22(1): 140—147.
- [11] 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.
- [12] Paulsen R J, Smith C F, O'Rourke D, et al. Development and evaluation of an ultrasonic ground water seepage meter[J]. *Groundwater*, 2001, 39(6): 904—911.
- [13] Moore W S, Sarmiento J L, Key R M. Submarine groundwater discharge revealed by ^{228}Ra distribution in the upper Atlantic Ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(5): 309—311.
- [14] 郭占荣, 黄磊, 刘花台, 等. 镭同位素示踪隆教湾的海底地下水排泄[J]. *地球学报*, 2008, 29(5): 647—652.
Guo Zhanrong, Huang Lei, Liu Huatai, et al. The estimation of submarine inputs of groundwater to a coastal bay using radium isotopes[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(5): 647—652.
- [15] Henderson R D, Day-Lewis F D, Lane J W Jr, et al. Characterizing submarine ground-water discharge using fiber-optic distributed temperature sensing and marine electrical resistivity[C]//Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2008. Denver, Colorado: Society of Exploration Geophysicists, 2008: 1427.
- [16] Henderson R D, Day-Lewis F D, Abarca E, et al. Marine electrical resistivity imaging of submarine groundwater discharge: sensitivity analysis and application in Waquoit Bay, Massachusetts, USA[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(1): 173—185.
- [17] Dimova N T, Swarzenski P W, Dulaiova H, et al. Utilizing multichannel electrical resistivity methods to examine the dynamics of the fresh water-seawater interface in two Hawaiian groundwater systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C2): C02012.
- [18] Johnson C D, Swarzenski P W, Richardson C M, et al. Ground-truthing electrical resistivity methods in support of submarine groundwater discharge studies: examples from Hawaii, Washington, and California[J]. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2015, 20(1): 81—87.
- [19] 任广欣, 郭秀军, 蒋甫伟, 等. 走航式水下多道电阻率探测系统研制与应用[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(3): 1430—1436.
Ren Guangxin, Guo Xiujun, Jiang Fuwei, et al. A navigated underwater DC resistivity survey system developed and used in detecting[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(3): 1430—1436.
- [20] Manheim F T, Krantz D E, Bratton J F. Studying ground water under Delmarva coastal bays using electrical resistivity[J]. *Ground Water*, 2004, 42(7): 1052—1068.

The research of electrical resistivity system's application effect simulation in coastal submarine confined groundwater discharge

Li Ning¹, Guo Xiujun^{1,2}, Ma Qiangwei¹, Zhang Yufeng¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Qingdao 266100, China)

Abstract: Confined groundwater discharge is a major form of submarine groundwater discharge. Because this process occurs in the bottom of seawater, detection is more difficult. To explore the detection capabilities of the marine multi-electrode resistivity method for this process, according to the typical geological model of the confined aquifer in the seabed, the geoelectric models with different drainage stages were constructed. Simulate sea surface and sea floor detection conditions, and compare the resulting resistivity profiles. The results of the study indicate that the water surface multi-electrode resistivity detection profile can clearly depict the migration and mixing process of freshwater excreted into the sea in seawater. However, the anomalous profile and resolution of the profile are affected by the detection device, electrode pole pitch, and seawater depth. Seabed surface detection results are more capable of reflecting the exchange process of brackish water in sediments, and the seawater intrusions in sediments can be well reflected.

Key words: submarine groundwater discharge; confined groundwater; resistivity method; detection effect