

基于高密度电法的潮汐作用对潍坊滨海地下水影响分析

苏 乔^{1,2}, 彭昌盛¹, 徐兴永², 付腾飞², 姚 菁²

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 国家海洋局海洋沉积与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要: 本文利用高密度电法连续监测数据, 基于统计学方法对潍坊滨海典型海水入侵区地层电阻率随潮汐作用的时空动态变化进行研究, 结果表明: 在地层沉积均匀的滨海地区, 无论单次测量还是重复测量, 地层电阻率值只在垂直方向上具有显著差异性。潜水面附近地层电阻率受潮汐影响最为明显, 因此, 利用高密度电法连续测量的方法分析滨海地区地下水随潮汐作用时空变化的方法是可行的。

关键词: 海水入侵; 高密度电法; 潮汐作用

中图分类号: X830.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2015)02-0286-04

The application of high density resistivity method to analysis the impact of tide on water table fluctuation in coastal aquifer

SU Qiao^{1,2}, PENG Chang-sheng¹, XU Xing-yong², FU Teng-fei², YAO Jing²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: Application the repeated measurement data of high - density resistivity method, the paper discusses the laws of formation resistivity change with tidal wave in north part coastal area of Weifang city. The results showed that, in homogeneous ground, formation resistivity value has significant difference only in vertical direction under both single and repeated measurement. Formation resistivity is obviously affected by tides in coastal area. Change e in formation resistivity near the water table is most obvious with the tidal, so using continuous repeated measurements data of high density resistivity method to analysis the changes of formation resistivity with tidal wave in coastal area is feasible.

Key words: seawater intrusion; high density resistivity method; tidal action

海岸带地区的海水入侵使滨海地区含水层中的淡水与海(咸)水之间的平衡状态遭到破坏, 导致海(咸)水沿含水层向陆地方向扩侵, 使淡水资源遭到破坏。海水入侵所发生的区域基本上为海洋与陆地的过渡带, 在这个过渡带内, 生态较为脆弱, 关于基本理论问题的研究很多, 是许多现代学科研究的焦点。

为掌握海水入侵的规律, 减少其危害, 世界上众多科学家, 自 20 世纪 70 年代开始对其发生、发展的规律进行了系统研究^[1-2]。在海水入侵问题的早期研究中, 大多数研究成果都是在假定海平面静止, 即不考虑潮汐波动影响的基础上得出的^[3-4]。随着海水入侵问题研究的不断深入, 越来越多的研究人员开始考虑海水入侵过程中潮汐作

收稿日期: 2014-01-03, 修订日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(41406072); 海洋公益性行业科研专项(201105020); 山东省海洋生态修复重点实验室开放基金(201207)

作者简介: 苏 乔(1983-), 男, 山东日照人, 助理研究员, 硕士, 主要从事海水入侵研究, E-mail: suqiao@fio.org.cn

用的影响。

目前,在海水入侵中的潮汐作用影响研究多集中在数值模拟及实验研究方面,如 Hailong Li 等提出了 L 型海岸线地区中地下水位随潮汐变化的解析解^[5],陈娟、左凤华等分别通过解析分析和数值仿真实验研究了地下水位的波动与潮汐波动的关系^[6-8];在较少进行的野外实测研究中, Lanyon J A、Ji-Hoon Kim、周训、阮传侠等分别利用实测数据分析了滨海含水层地下水水位波动的原因以及波动的位相、周期、振幅对海潮潮汐的响应等过程^[10-14]。

总的来说,海水入侵中的潮汐作用影响研究中数值模拟和实验分析为主,野外实测研究主要利用观测井的水位与水质数据做数理统计分析,只能实现地下水的点状分析,研究受到极大限制。本文主要通过高密度电法连续监测的方法,基于统计学方法对莱州湾南岸典型海水入侵区地下水的时空动态变化进行研究,探索一种海水入侵研究中潮汐影响研究的新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区域及剖面设置

莱州湾南岸滨海地区属于温带季风型大陆性气候区,因濒临海洋,具有海洋性气候特征,地下水补给主要以大气降水入渗为主。20 世纪 70 年代末以来,莱州湾南岸地区处于经济高速发展和人口压力剧增的时期,人类活动对环境的扰动显得尤为突出,其独特的地理位置、地质环境演化背景及对气候变化的敏感性,成为我国受人类活动和自然因素引起的自然灾害最严重的地区之一,也是我国乃至世界海(咸)水入侵的典型地区。

本研究高密度测量剖面位于潍坊市北部滨海地带,是我国典型的粉沙淤泥质海岸,第四纪厚度一般为 60 ~ 150 m,由一套海陆交互相的含水砂层和粘土层组成,整体上自南向北逐渐增厚,含水层的沉积物以粉砂和细砂为主,粗砂和砾石分布比较局限^[15]。测量剖面起点位于平均大潮线,向海方向延伸,由附近水文钻井资料可知,含水层以粉砂和细砂为主,其中在 13 m 深度存在粘土层。

1.2 研究方法

本研究采用 GeoPen E60DN 高密度电法仪,设置剖面总长度 395 m,采用温纳装置,测量电极 80 个,电极间距 5 m。自 2013 年 10 月 29 日 18:31 起,至 2013 年 10 月 30 日 17:00 时止,共重复测量 25 次,首次测量结束时间记为 0,其后分别

按每次测量完成时间记为 52, 106, 157 …… 1348 min。

2 结果与讨论

2.1 多独立样本检验

高密度电法测量原始数据为倒三角形数据,即第 1 层数据量最多,越往下每层数据量逐渐减少,到最后一层则仅有 2 个数据。为减少统计分析中由于数据行列极度不平衡引起的统计误差,我们从原始数据中选取矩形数据进行分析,其中在垂直方向上选择上侧 22 层数据,在水平方向上选用中间 69 列数据,即距测量起点 112.5 ~ 282.5 m 之间,水平间隔每 2.5 m 取一列数据,单次测量剖面共计 665 个坐标点数据,共 25 组数据。

SPSS 软件提供的非参数检验中的多独立样本检验 Kruskal-Wallis 方法是一种推广评价价值检验,基本思路是对所有样本合并,并按升序排列得出每个数据的秩,然后对这各组样本求平均秩,如果平均秩相差很大,则认为两组样本所属的总体有显著差异。我们利用这种检验方法分析单次测量中不同层与不同列之间的电阻率数据是否存在显著性差异,按层进行分组,检验结果卡方值为 54.323,自由度为 9, $p < 0.05$,表明不同层之间的电阻率值存在显著性差异;按不同水平距离的电阻率数据进行分组,检验结果卡方值为 45.011,自由度为 40, $p > 0.05$,表明不同水平距离上的电阻率值没有统计学差异。从多独立样本数据检验来看,地层电阻率值在垂直变化上存在显著差异,而在水平距离上没有显著差异。

2.2 重复测量检验

重复测量数据的方差分析是指分别在不同的时间点上通过重复测量同一个受试对象获得指标的观察值,用来分析该观察指标在不同时间点上的变化特点。将选择的高密度电法矩形数据,利用 spss 软件进行重复测量分析,分析时间对海岸带地区地层电阻率变化的影响。将水平方向按列编号,共计 69 列,变量名记为水平;将垂直方向按层编号,共计 22 层,变量名记为垂直;将 25 次地层电阻率测量数据按顺序排列,变量名分别记为 T1 ~ T25。利用 SPSS 软件对数据进行重复测量分析,其中因子名称为电导率,因子级别为 25,群体内部变量为 T1 ~ T25,因子列表为垂直和水平。

分析前要对重复测量数据之间是否存在相关性进行球形检验。如果该检验结果为 $p > 0.05$,则说明重复测量数据之间不存在相关性,测量数

据符合 Huynh-Feldt 条件,可以用单因素方差分析的方法来处理;如果检验结果 $p < 0.05$ (p 值为 Sig. 列),则说明重复测量数据之间是存在相关性的,检验结果则以多变量检验结果为准。从重复测量检验结果中 Mauchly 的球形度检验(表 1),可以看出, $p < 0.05$ (p 值为 Sig. 列),因变量的协方差阵不满足球形假设,说明各次重复测量的结果存在关联,检验结果以多变量检验结果为准。

表 1 Mauchly 的球形度检验

Tab. 1 Mauchly's Test of Sphericity

主体内效应	近似卡方	df	Sig.	Epsilon		
				Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt	下限
电阻率	21818.79	324	0.000	0.158	0.184	0.040

从多变量检验结果可以看出(表 2),25 个时间点的电阻率重复测量显著性 $p < 0.05$,具有明显差异;电阻率与水平方向的检验统计量结果显示 $p > 0.05$ (Pillai 的轨迹最为稳健,当 4 个统计量结果不一致时,以此为最终结论),说明 25 个时间点的电阻率值在水平方向上无统计学差异;电阻率与垂直方向的检验统计量结果显示 $p < 0.05$,即 25 个时间点的电阻率值在垂直方向上

存在显著差异。多变量检验结果说明测量剖面地层电阻率值随时间在垂直方向上的变化明显,而在水平方向上变化不明显。

2.3 垂直方向时间分析

根据重复测量检验结果,高密度剖面地层电阻率值随时间在垂直方向上的变化明显,而在水平方向上变化不明显。因此,我们选取测量剖面水平方向中间位置,即距剖面起点 200 m 处垂直方向进行分析,共选取 11 层数据。从电阻率值来看,剖面垂直方向数据变化较大,其中第 6 层电阻率值在 $30 \sim 50 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,10、11 层电阻率值在 $1 \sim 1.2 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,其它各层电阻率数值一般小于 $1 \Omega \cdot \text{m}$,除第 6 层外,各层较低的电阻率判断为该层已经基本达到饱和咸水状态。根据当地水文钻井资料,地层 13 m 处为粘土层,根据各层电阻率值分析,测量剖面第 6 层数据符合粘土层特征,判断为粘土层,同时可知该剖面电极间距 60 m 时测量地层深度 13 m。9~11 层地层电阻率略高于其它各层(除第 6 层),认为主要是由于地层孔隙度较小,导致饱和咸水时电阻率值相对其它各层稍高。

表 2 重复测量多变量检验结果

Tab. 2 Repeated Measures Analysis

效应		<i>F</i>	值	假设 <i>df</i>	误差 <i>df</i>	<i>Sig.</i>
电阻率	Pillai 的跟踪	29.643 ^b	0.573	25.000	553.000	0.000
	Wilks 的 Lambda	29.643 ^b	0.427	25.000	553.000	0.000
	Hotelling 的跟踪	29.643 ^b	1.340	25.000	553.000	0.000
	Roy 的最大根	29.643 ^b	1.340	25.000	553.000	0.000
电阻率 * 水平	Pillai 的跟踪	1.002	2.606	1675.000	14425.000	0.472
	Wilks 的 Lambda	1.006	0.059	1675.000	13165.319	0.429
	Hotelling 的跟踪	1.011	3.072	1675.000	13777.000	0.383
	Roy 的最大根	3.206 ^c	0.372	67.000	577.000	0.000
电阻率 * 垂直	Pillai 的跟踪	2.123	1.698	500.000	11440.000	0.000
	Wilks 的 Lambda	2.329	0.141	500.000	8737.247	0.000
	Hotelling 的跟踪	2.543	2.308	500.000	11022.000	0.000
	Roy 的最大根	17.901 ^c	0.782	25.000	572.000	0.000

第 6 层高密度电法数据对应粘土层,粘土层为隔水层或弱透水层,受海水进退影响较小,同时其数值远远高出其它各层,因此我们利用其它 10 层数据进行地层电阻率随时间变化分析,结果见图 1。

根据电阻率测量值判断,1~4 层电阻率值曲线较稳定,数值多低于 $0.7 \Omega \cdot \text{m}$;第 7 层,第 9~11 层电阻率波动不大,较前 4 层数值相对较高,但仍然处于较低值(小于 $1.4 \Omega \cdot \text{m}$);第 5 层与第 8 层电阻率数值变化最为剧烈,受潮汐作用影响明显。

2.4 地层电阻率与潮汐的关系

从前面分析我们得出第 5 层与第 8 层数据波动最为明显,我们对这两层电阻率的数值变化与潮汐作用进行了对比。潮汐数据采用潍坊环境监测站潮位资料,自 2013 年 10 月 29 日 17 时~10 月 30 日 17 时,每小时 1 个数据。电阻率与潮汐随时间变化见图 2,第 5 层电阻率在最高潮位有一个突变,而在其它时间变化不明显。潍坊北部滨海为典型的粉沙淤泥质海岸,潮滩广阔,低潮与高潮距离相差 3000~4000 m 远^[16],当潮位由低潮至高潮时,海水迅速进展到测量剖面附近,导

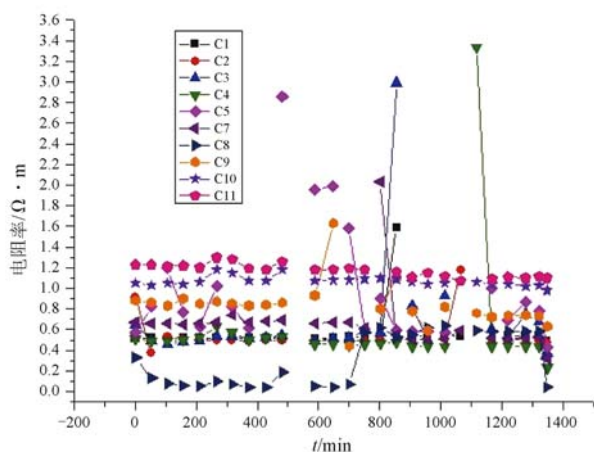


图1 不同地层电阻率随时间变化

Fig. 1 Variations of formation resistivity level with time 致与海水有水力联系的潜水面水位在高潮时突然升高,因此,我们判断第5层处于潜水面附近,受潮汐影响显著,而地层电阻率随潮位升高而升高,表明当地潜水面已受海水侵染,海水的侵入导致地层含盐量降低,从而使地层电阻率升高。第8层电阻率数值最小,曲线趋势先下降,在约700 min时突然升高,在最后一次测量时(1348 min)又突然下降,存在一个明显的约11~12 h的周期,与当地潮汐周期较吻合,但由于没有后续测量数据,此周期是偶然形成还是由于潮汐作用引起的有待于进一步研究。

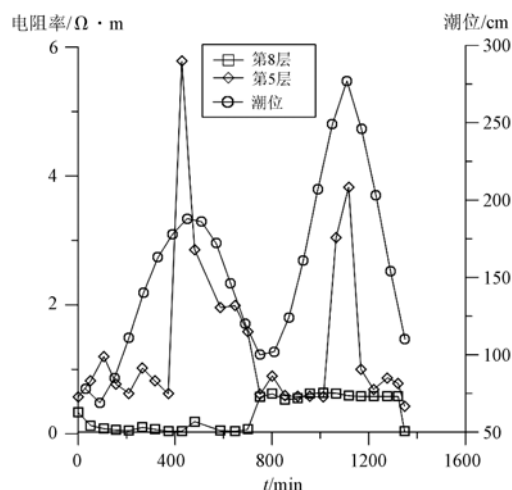


图2 潮位与电阻率随时间变化

Fig. 2 Variations of formation resistivity and tidal with time

3 结论

(1)在地层沉积均匀的滨海地区,无论是利用单次高密度测量数据进行多样本独立检验,还是利用多次重复测量数据进行重复测量检验,都说明地层电阻率值在水平方向上变化不明显,而

在垂直方向上具有显著差异性。

(2)根据地层电阻率与潮汐对比,我们认为第5层电阻率代表地下潜水面;而第8层电阻率变化周期与当地潮汐周期较吻合,但由于没有后续测量数据,此周期是偶然形成还是由于潮汐作用引起的有待于进一步研究。

(3)垂直电阻率数据时间分析表明,滨海地区地层电阻率受潮汐影响波动明显,利用高密度电法连续测量的方法分析滨海地区地下水随潮汐作用的时空变化的方法是可行的。

参考文献:

- [1] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Elsevier Science, 1972:437-451.
- [2] BEAR J. Hydraulics of groundwater[M]. New York: McGraw - Hill International Book Co., 1979:290-332.
- [3] TODD D K. Groundwater hydrology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1980:494-521.
- [4] BEAR J, VERRUIJT A. Modeling groundwater flow and pollution [M]. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company, 1987: 196-208.
- [5] LI H L, JIAO J J. Tidal groundwater level fluctuations in L-shaped leaky coastal aquifer system[J]. Journal of Hydrology, 2002, 268(1/2/3/4): 234-243.
- [6] 陈娟, 李欲如. 潮汐对沿海潜水水位的影响研究[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(12): 708-710.
- [7] 陈娟, 庄水英, 李凌. 潮汐对地下水波动影响的数值模拟[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 512-515.
- [8] 吴龙华, 庄水英, 李凌, 等. 潮汐对近岸地下水水位波动影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 228-231.
- [9] LANYON J A, ELIOT I G, CLARKE D J. Groundwater - level variation during semidiurnal spring tidal cycles on a sandy beach [J]. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 1982, 33(3): 377-400.
- [10] KIM J H, LEE J, CHEONG T J, et al. Use of time series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimje, Korea [J]. Journal of Hydrology, 2005, 300(1/2/3/4): 188-198.
- [11] 周训, 阮传侠, 方斌, 等. 海潮及其影响下海岸带地下水位时间序列的周期性和滞后性[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 71-79.
- [12] 阮传侠, 周训, 欧业成, 等. 海潮引起滨海含水层地下水位变化的初步研究[J]. 地质通报, 2006, 25(4): 512-515.
- [13] 付丛生, 陈建耀, 曾松青, 等. 滨海地区潮汐对地下水位变化影响的统计学分析[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1365-1376.
- [14] 高茂生, 叶思源, 史贵军, 等. 潮汐作用下的滨海湿地浅层地下水动态变化[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 24-37.
- [15] 王珍岩, 孟广兰, 王少青. 渤海莱州湾南岸第四纪地下卤水演化的地球化学模拟[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 49-53.