

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.15

采用高密度电法仪监测围垦区土壤盐分变化

周煜,余夏杨,周廷璋,辛沛

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:为探究自然条件下围垦区盐渍土盐分的变化情况,采用高密度电法仪进行大尺度野外观测,研究了江苏条子泥滩涂围垦区不同时期的地下水埋深及土壤盐分变化情况。结果表明:4 m 深度范围以内是最容易受到自然条件影响的区域,其中非饱和区受影响最为显著,而深度超过4 m 的区域受影响较小;浅层饱和区1.5 m 深度范围盐度变化明显,且旱季盐度明显高于雨季,但深层土壤的盐度没有出现显著的变化;围垦区地下水埋深浅,自然条件下土壤脱盐缓慢,建议采取如埋设暗管等措施加快脱盐速度。

关键词:高密度电法仪;地下水埋深;土壤盐度;土壤视电阻率;条子泥滩涂围垦区

中图分类号:TV122 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-6933(2018)02-0096-06

Monitoring on change of soil salinity with high-density resistivity instrument in a reclaimed area

ZHOU Yu, YU Xiayang, ZHOU Tingzhang, XIN Pei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, high-density resistivity instrument is applied to measure the change of soil salinity in reclaimed lands. The groundwater depth and the change of soil salt in different period of Tiaozini reclamation area in Jiangsu Province were studied. Results show that 4 m within the depth range is the most vulnerable area affected by natural conditions. The most influential area is unsaturated area, while the depth of more than 4 m is less affected. The salinity changes in the depth range of 1.5 m in the shallow saturated zone, and the salinity of the dry season is obviously higher than that in the rainy season, but there is no significant change in the salinity of the deep soil. The groundwater in the reclamation area is shallow, and the soil desalination is slow under natural conditions. It is suggested to take measures such as buried pipe to accelerate the speed of desalting.

Key words: high-density resistivity instrument; groundwater level; soil salinity; apparent resistivity of soil; Tiaozini reclamation area

盐渍土分布广泛,我国从湿润地区到干旱地区,从滨海到内陆,均存在大量盐渍土。据统计,我国盐渍土面积为 $3.47 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国可利用土地面积的 4.88%^[1-2]。在过去的30年间,滨海地区由于围垦产生的盐渍土面积高达 $7.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 其中江苏围垦沿海滩涂面积达 $2.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[3], 作为重要的

土地后备资源,对其合理利用不仅可以缓解江苏土地的供需矛盾,还可以促进江苏沿海经济的发展。

为揭晓盐渍土成因,掌握土壤脱盐规律,合理有效地利用盐渍土,国内外许多学者对盐碱地进行了大尺度的野外观测。早期学者多采用定点定期采样的方法,分析土壤的盐含量,并结合水化学技术监

基金项目:国家自然科学基金(51579077)

作者简介:周煜(1993—),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学。E-mail:zhouyuhhu@163.com

通信作者:辛沛,教授。E-mail:pei.xin@outlook.com

测、研究水盐的运移规律。随着科技的进步发展,高密度电法仪逐渐被应用于水文地质领域。不同于传统的监测手段,高密度电法仪通过直接测量土壤视电阻率,来间接反映地质构造和土壤孔隙水状况,具有连续、便捷、破坏性小等特点。

目前,多将高密度电阻率法运用到海水入侵的研究中,如 Sutter 等^[4]在新西兰滨海地区,通过高密度电阻率法分析海水位季节性变化对浅土层盐分分布的影响。Mart 等^[5]结合高密度电阻率法、瞬变电磁法、电测深法,探索研究区海水入侵的程度。Huizer 等^[6]采用高密度电阻率法监测滨海地区潮汐波浪影响下的地下水盐度变化。类似地, Capizzi 等^[7-13]将高密度电阻率法应用到海水入侵区,圈定海水入侵的大致范围。Nijland 等^[14-15]根据高密度电阻率法探究土壤水分随时间变化的规律。Martínez 等^[16]验证了高密度电阻率法对咸水入侵过的滨海沉积系统的水盐监测具有高效性。部分学者将高密度电阻率法与数模相结合,用于预测海水入侵。如 Beaujean 等^[17-18]把地下水监测井和高密度电阻率法的实测结果作为标准,来校核海水入侵模型的参数。也有学者根据高密度电阻率法的测量结果,修正了公式中的经验系数,如 Maillet 等^[19]通过高密度电阻率法探明了滨海高盐度古渠道的内部体系结构演变和回填进程,并修正了阿尔奇公式以确定测区条件。国内在水文地质领域应用高密度电阻率法起步较晚,目前已有研究人员把高密度电阻率法二维、三维成像技术应用到莱州湾^[20-23]、胶东半岛^[24]、海南^[25]、广东^[26]、辽宁^[27]等滨海地区,率定出氯离子浓度和电阻率的关系曲线,判定了海水入侵的范围,使得不同监测指标联合监测水盐运移成为可能。苏乔等^[28]利用高密度电阻率法分析了潍坊滨海地下水在潮汐作用下的时空变化。

高密度电阻率法尽管已经在海水入侵地区应用较多,但在滩涂围垦区却鲜有报道。本研究采用高密度电阻率法,结合气象站观测、地下水取样等手段,监测江苏条子泥围垦区土壤盐分变化,获取了较为可靠的监测数据,以期为研究自然条件下的土壤脱盐和反盐规律、后续改良盐渍土、提高土壤肥力起指导作用。

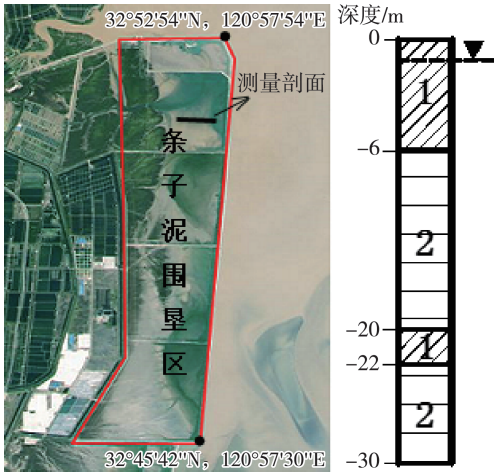
1 研究区概况与监测方法

1.1 研究区概况

条子泥工程是江苏沿海滩涂围垦的先导工程(图1)。该围垦区北起梁垛河口,南至方塘河口,西界为东台沿海中南部垦区外堤线,属淤泥质海

岸^[29],目前已完成一期 0.67 万 hm^2 的匡围工程,新围海堤 27.4 km,新筑隔堤 14.3 km。

条子泥围垦区隶属于扬子地层区,基岩在地表没有外露,为第四纪滨海相沉积所形成且埋深达到数百米。在观测区附近钻井进行地层分析(图1)。第一层为轻粉质沙壤土,夹杂壤土团块,表层常见植物根茎和黑色有机质,厚度约为 6 m,埋深在地表至地下 6 m 处,土壤含水率为 30% ~ 33%,孔隙比为 0.85 ~ 0.89,属于中等透水土层;第二层为粉砂,厚度约为 14 m,埋深在地表以下 6 ~ 20 m,土壤平均含水率为 29.1%,孔隙比为 0.82,属于中等透水土层;而埋深 20 ~ 22 m 处的土层与第一层类似,主要为轻粉质沙壤土,土壤平均含水率为 33%,孔隙比 0.94,属于弱透土层;埋深 22 ~ 30 m 处与第二土层类似为粉砂,土壤平均含水率 29%,孔隙比 0.83,属于中等透土层。围垦区地下水补给来源为大气降水和地表水,主要排泄方式为蒸发和径流。



1—轻粉质沙壤土 2—粉砂
图1 条子泥围垦区

1.2 监测手段

本研究在条子泥自然保护区(毗邻土壤改良区)进行,围垦区原本是滩涂,受海水浸淹,地下水为海水。围垦后和近海隔离,不再受潮汐周期性浸淹。

设置地下水位监测井用来投放水位计,监测高密度电法仪测量期间的地下水埋深;由孔隙水取样并提取不同深度的浅层地下水水样,并通过多参数水质测量仪(YSI ProPlus)分析水样的盐度。

采用多通道高密度电法仪(ERT SuperSting R8/IP)进行观测区(图1中红线所示)固定剖面的测量,通过反演图像宏观掌握测量区的盐度分布情况。此外,导出相关深度的电阻率数据,进行时间尺度的分析对比,了解浅层与深层土壤的盐度变化,并采用浅层地下水水样检测的方法来印证。

1.3 观测步骤

围垦区 2016 年 10—12 月出现了持久的强降雨天气,降雨量共计 420 mm,约为年平均降雨量的 40%,因而将 12 月作为 2016 年雨季进行野外观测。而次年 5 月降雨量不足 30 mm,遂将该月作为旱季进行观测。在固定剖面处进行高密度电法仪的二维布线,经过选择测量模块、检测接地电阻等一系列准备工作后,开始测量,同时,读取水位计记录的地下水埋深,并采集地下水水样现场测定盐度。

2 高密度电法仪基本原理

SuperSting R8/IP 多通道高密度电法仪由美国 AGI 公司生产,本次所使用的仪器配备有 64 个转换电极,可自定义发射周期和重复观测次数,具有自动智能、高精度高稳定性等优点。该仪器采用 EarthImager 反演软件进行数据处理,它将野外的实测电流和电位差反演成地下土壤电阻率分布,从而可以推断出地下的构造特征及各种异常体(图 2)。

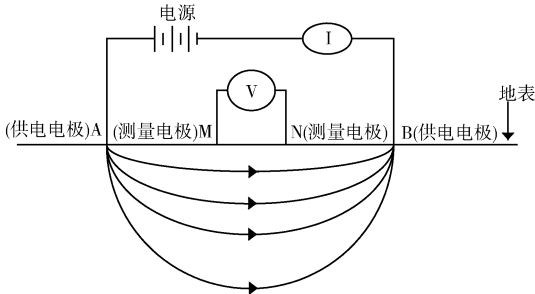


图 2 原理示意图

高密度电阻率法具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、效率高等特点。但其实质仍然是直流电阻率法,因此其基本原理与传统的电阻率法一致。根据式(1)、(2),可计算出其视电阻率,再通过分析,可判断地层异常情况。

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \tag{1}$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{l_{AM}} - \frac{1}{l_{AN}} - \frac{1}{l_{BM}} + \frac{1}{l_{BN}}} \tag{2}$$

式中: ρ 为视电阻率, $\Omega \cdot m$; ΔV 为测量电极 M 和 N 之间的电位差, V; I 为系统供电电流, A; K 为装置系数,仅与电极布置位置有关, m; l_{AM} 、 l_{AN} 、 l_{BM} 、 l_{BN} 为供电电极和测量电极之间的距离, m。

高密度电阻率法常用的测量装置包括施伦贝格装置、温纳装置、偶极装置、中间梯度装置等。国内学者冯锐等^[30]在计算 Barker 等^[31]1979 年提出的敏感度系数时发现,温纳装置对地下介质的垂向变化反应最为灵敏,由于围垦区土壤电阻率低于 $2\Omega \cdot m$,且垂向变化较小,因此测量装置采用温纳装置。

图 3 为温纳装置跑极示意图,其中 A、B 为供电电极, M、N 为测量电极, $l_{AM} = l_{MN} = l_{NB} = na$ (a 为电极间距, m; n 为隔离系数,取值 1, 2, 3, $\dots$)。由式(2)得装置系数 $K = 2\pi na$,是常规排列中最小的一种,但温纳装置却具有最大的信号强度($1/K$),即在供电电流不变的情况下,温纳装置能产生最大的信号强度。因此,在较高噪声干扰的工况中,温纳装置往往是测量的不二选择。跑极时, A、M、N、B 保持间距不变,整体逐点向右移动,得到第一层测点,再改变隔离系数 n ,使 $n = 2, 3, 4, \dots$, 同样整体逐点右移,依次可以得到第 2, 3, 4, $\dots$ 层测点,最终将形成一个倒梯形的测量剖面。

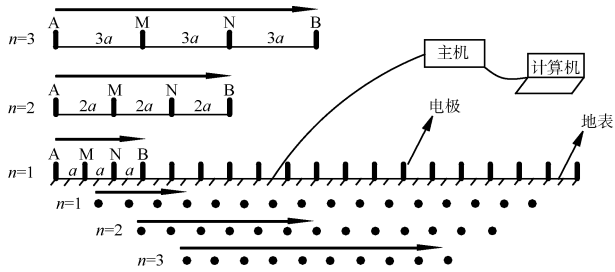


图 3 温纳装置跑极示意图

3 结果与分析

3.1 不同时期的反演图像

围垦区土壤电阻率主要受土壤含水率、盐度、土质等因素影响,观测区位于条子泥围垦区的自然保护区内,不同时期反演结果的差异主要由土壤含水率及盐度引起,其中土壤饱和带的变化主要由孔隙水盐度决定。水位监测结果表明,围垦区地下水不受堤外潮汐波浪的影响,埋深相对稳定;2016 年 12 月份降雨量大,地下水埋深稳定为 0.32 m;2017 年 5 月份降雨量较小,地下水埋深稳定在 0.66 m。

采用高密度电法仪进行测量时,电极间距布设为 2 m,剖面总长为 126 m,探测深度约为 24 m,电极排列方式为温纳排列,反演程序选用 EarthImager 2D 低阻模块。图 4 为不同时期的二维反演电阻率断面,大致反映了测量剖面的电阻率分布情况,图 4 中红色实线表示地下水位,整个剖面电阻率值介于 $0.6 \sim 1.6 \Omega \cdot m$ 之间,有很明显的电阻率色块分层现象。

非饱和区土壤为轻粉质沙壤土,反演色块相对杂乱,与 12 月份相比,5 月份大量深色块呈斑点状出现;在测线 77~91 m 区域出现的局部高阻,12 月份呈点带状分布,最大电阻率值为 $1.6 \Omega \cdot m$,而 5 月则呈团簇状分布,最大电阻率值为 $1.2 \Omega \cdot m$ 。在 6 m 深度内的浅层饱和区,土质为轻粉质沙壤土,但电阻率值小于非饱和区,不足 $1 \Omega \cdot m$,这是由土壤

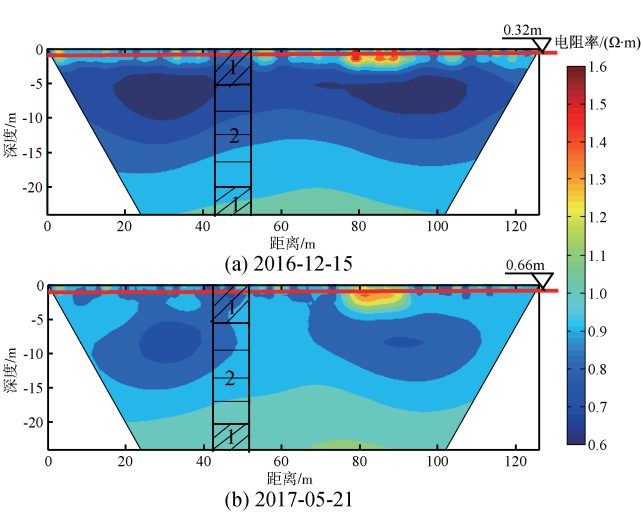


图4 不同时期的二维反演电阻率断面图

含水率大于非饱和区引起的,并且该区域5月份的深色斑块较12月有了明显的增多。饱和区深度6~20 m内,为粉砂层,这层土壤的电阻率色块较为单一,表明盐分分布均匀,电阻率值为整个剖面最低,变化范围在 $0.6 \sim 0.8 \Omega \cdot \text{m}$,与12月对比,5月份电阻率为 $0.6 \sim 0.7 \Omega \cdot \text{m}$ 的色块依然存在,但 $0.7 \sim 0.9 \Omega \cdot \text{m}$ 的色块却有减少的趋势。在20~25 m深的土壤饱和区,土质仍以轻粉质沙壤土为主,但电阻率比粉砂层略有增大,达到 $0.9 \sim 1.1 \Omega \cdot \text{m}$,且5月份 $1 \Omega \cdot \text{m}$ 的色块面积有略有增大。

3.2 非饱和区土壤视电阻率的变化

将测量的视电阻率数据导出进行分析,图5表示非饱和区的土壤视电阻率均值。非饱和区土层厚度不足1 m,两次所测土壤视电阻率均出现了强烈的不规则波动现象,表明非饱和层土壤的含水量及盐度分布极不均匀。对比2016年12月与2017年5月的测量结果,前者的视电阻率整体大于后者,且前者波动程度更为强烈,这是由不同季节土壤含水率及盐度的变化引起。在测线77 m处出现的波峰区域,12月份达到最大值 $1.7 \Omega \cdot \text{m}$,随着时间推移,5月份时波峰明显减弱,视电阻率最大值为 $1.2 \Omega \cdot \text{m}$,并且在测线47 m、72 m处出现了多个波谷,视电阻率为 $0.7 \Omega \cdot \text{m}$,波峰削弱波谷增强,自然条件的变化直接影响了非饱和区土壤视电阻率的变化。

3.3 饱和区浅层土壤视电阻率的变化

饱和区的土壤视电阻率与孔隙水盐度呈负相关关系,因此土壤视电阻率的变化间接反映了盐度的变化。图6表示饱和区1~2 m、2~3 m、3~4 m深度不同时期的土壤视电阻率均值,与之对应的是表1中不同埋深的地下水盐度。如图6(a),1~2 m深度的土壤视电阻率波动明显弱于非饱和区,测线77 m

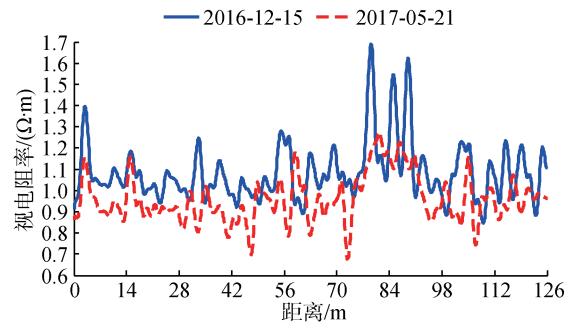
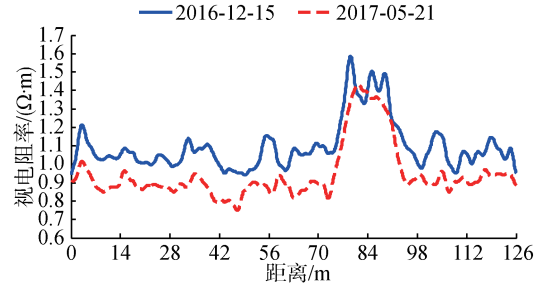
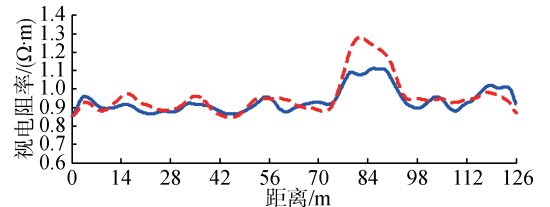


图5 非饱和区土壤视电阻率

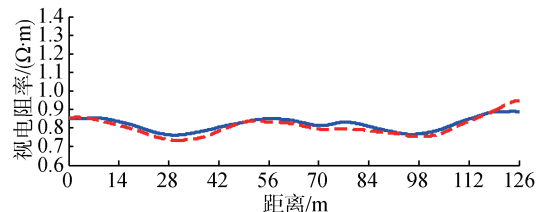
处的视电阻率峰值也降低 $0.1 \Omega \cdot \text{m}$,这表明1~2 m深度的土壤受自然条件影响减弱。5月份土壤视电阻率均值比12月低 $0.18 \Omega \cdot \text{m}$,测得5月份1.5 m深度的地下水盐度为 29.17 g/kg ,12月份为 24.72 g/kg ,表明在1.5 m深度,旱季孔隙水盐度明显高于雨季。由图6(b)可知,2~3 m深度的土壤视电阻率波动弱于1~2 m,曲线起伏趋于平缓,测线77~91 m处的多个波峰也大幅减弱,最大视电阻率值仍达到 $1.2 \Omega \cdot \text{m}$,这表明2~3 m深度的土壤依然受到自然因素的影响。但两个时期的土壤视电阻率值没有出现明显的差异,并且12月份在埋深2.5 m处的孔隙水盐度为 29.26 g/kg ,5月份为 29.84 g/kg ,这表明深度在2~3 m的孔隙水盐度并未发生明显变化。图6(c)表示深度在3~4 m的饱和带电阻率均值,此深度的土壤视电阻率值基本稳定,测线77~91 m处的高阻也已经消失,两次的测



(a) 深度1~2 m



(b) 深度2~3 m



(c) 深度3~4 m

图6 饱和区不同深度浅层土壤视电阻率

量结果重合度较高,表明3~4 m深度的土壤已不受外界自然条件的影响。而表1中,3~4 m深度12月与5月的地下水盐度分别为29.54 g/kg、30.09 g/kg,也没有发生明显变化,说明深度在3~4 m的孔隙水盐度也未发生变化。

表1 浅层饱和区不同深度水样的盐度

日期	浅层饱和区不同深度水样的盐度/(g·kg ⁻¹)		
	1.5 m	2.5 m	3.5 m
2016-12-15	24.72	29.26	29.54
2017-05-21	29.17	29.84	30.09

不同深度的土壤视电阻率分布曲线表明,4 m深度范围内是最易受自然因素影响的区域,并且非饱和和带受影响最为强烈;结合孔隙水盐度的变化可知,自然条件下剖面1.5 m深度内的孔隙水盐度变化最为明显,旱季孔隙水盐度高于雨季。另外,围垦区地下水埋深浅,土壤盐含量居高不下,盐渍土脱盐速度非常缓慢,因此需采取如埋设暗管等措施加快脱盐速度。

3.4 饱和区深层土壤视电阻率的变化

图7表示饱和区10~11 m、14~15 m、19~20 m深度的土壤视电阻率均值。深度10~11 m的土层

为粉砂层,其视电阻率曲线光滑平整,12月与5月的土壤视电阻率值差异较小,但在测线28 m、98 m处均出现了波谷,土壤视电阻率达到最低值0.8 Ω·m;深度14~15 m的土层仍为粉砂层,土壤视电阻率未出现不规则波动,12月所测视电阻率均值比5月大0.02 Ω·m,可以忽略不计,波谷处视电阻率达到最低值0.9 Ω·m;在19~20 m深度,土层以轻粉质沙壤土为主,土壤视电阻率分布均匀,12月份的测量结果仍略大于5月。不难发现,随着深度的增加,土壤视电阻率波动减弱,表明深层土壤不受自然条件影响;雨季和旱季的土壤视电阻率变化微小,表明孔隙水盐度未发生显著变化。

4 结 语

a. 围垦区4 m深度范围内是最容易受到自然条件影响的区域,其中非饱和区受影响最为显著,4 m以下区域受影响较小。

b. 浅层饱和区1.5 m深度范围盐度变化明显,且旱季盐度明显高于雨季,但深层土壤的盐度没有出现显著的变化。

c. 围垦区地下水埋深浅,自然条件下土壤脱盐缓慢,因此需采取如埋设暗管等措施加快脱盐速度。

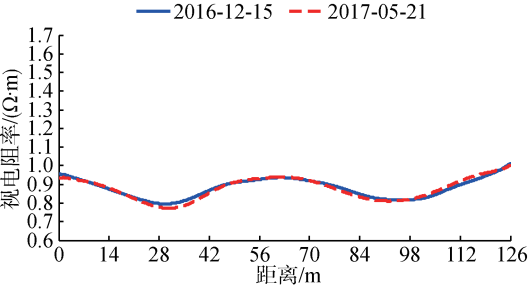
本文基于高密度电阻率法,探究了观测剖面的土壤电阻率分布情况,并通过提取孔隙水水样进行验证,但对深层土壤电阻率的率定还有待进一步的研究。

参考文献:

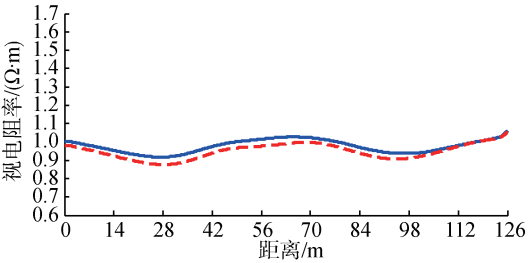
[1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (5): 837-845. (YANG Jingsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (5): 837-845. (in Chinese))

[2] 俞仁培. 对盐渍土资源开发利用的思考 [J]. 土壤通报, 2001, 32 (增刊 1): 138-140. (YU Renpei. Ideas about exploitation and utilization of saline soil resources [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32 (sup1): 138-140. (in Chinese))

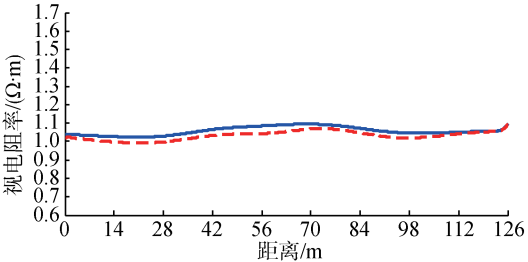
[3] 吴宝成, 刘启新, 胡君, 等. 江苏东台市不同时期围垦区滩涂植物群落特征变化 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (6): 44-50. (WU Baocheng, LIU Qixin, HU Jun, et al. Variation of characteristics of plant community in tidal flats during different reclamation periods in Dongtai City, Jiangsu Province [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (6): 44-50. (in Chinese))



(a) 深度 10~11 m



(a) 深度 14~15 m



(c) 深度 19~20 m

图7 饱和区深层土壤视电阻率

- [4] SUTTER E, INGHAM M. Seasonal monitoring of saline intrusion in an unconfined coastal aquifer in New Zealand using DC resistivity traversing [C]//MATIAS M S, GRANGEIA C. 8th meeting EEGS-ES Environmental and Engineering Geophysics, Proceedings Book. Aveiro, Portugal;University of Aveiro,2015.
- [5] MART NEZ-MORENO F J, MONTEIRO-SANTOS F A, BERNARDO I, et al. Identifying seawater intrusion in coastal areas by means of 1D and quasi-2D joint inversion of TDEM and VES data [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552:609-619.
- [6] HUIZER S, KARAOULIS M C, ESSINK G H P O, et al. Monitoring and simulation of salinity changes in response to tide and storm surges in a sandy coastal aquifer system [J]. Water Resources Research, 2017, 53 (8) : 6487-6509.
- [7] CAPIZZI P, CELLURA D, COSENTINO P, et al. Integrated hydrogeochemical and geophysical surveys for a study of sea-water intrusion [J]. Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata, 2010, 51 (4) : 285-300.
- [8] LENAHAN M J, BRISTOW K L. Understanding sub-surface solute distributions and salinization mechanisms in a tropical coastal floodplain groundwater system [J]. Journal of Hydrology, 2010, 390 (3/4) : 131-142.
- [9] ZARROCA M, BACH J, LINARES R, et al. Electrical methods (VES and ERT) for identifying, mapping and monitoring different saline domains in a coastal plain region (Alt Empordà, Northern Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2011, 409 (1/2) : 407-422.
- [10] AYOLABI E A, FOLORUNSO A F, ODUKOYA A M, et al. Mapping saline water intrusion into the coastal aquifer with geophysical and geochemical techniques: the University of Lagos campus case (Nigeria) [J]. Springerplus, 2013, 2 (1) : 1-14.
- [11] MCINNIS D, SILLIMAN S, BOUKARI M, et al. Combined application of electrical resistivity and shallow groundwater sampling to assess salinity in a shallow coastal aquifer in Benin, West Africa [J]. Journal of Hydrology, 2013, 505 (21) : 335-345.
- [12] KURIA Z, WOLDAI T, OPIYO-AKECH N. Imaging salt water intrusion into coastal aquifers with electrical resistivity tomography at Lamu Island, South Coast Kenya [J]. African Journal of Science & Technology, 2010, 11 : 57-72.
- [13] KAZAKIS N, PAVLOU A, VARGEMEZIS G, et al. Seawater intrusion mapping using electrical resistivity tomography and hydrochemical data. An application in the coastal area of eastern Thermaikos Gulf, Greece [J]. The Science of the total environment, 2016, 543:373-387.
- [14] NIJLAND W, VAN DER MEIJDE M, ADDINK E A, et al. Detection of soil moisture and vegetation water abstraction in a Mediterranean natural area using electrical resistivity tomography [J]. Catena, 2010, 81 (3) : 209-216.
- [15] SCHWARTZ B F, SCHREIBER M E, YAN T. Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging [J]. Journal of Hydrology, 2008, 362 (3/4) : 234-246.
- [16] MART NEZ J, BENAVENTE J, GARC A-AR STEGUI J L, et al. Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion-extrusion effects: the river Vélez delta (Vélez-Málaga, southern Spain) [J]. Engineering Geology, 2009, 108 (3/4) : 161-168.
- [17] BEAUJEAN J, NGUYEN F, KEMNA A, et al. Calibration of seawater intrusion models: inverse parameter estimation using surface electrical resistivity tomography and borehole data [J]. Water Resources Research, 2014, 50 (8) : 6828-6849.
- [18] COMTE J C, BANTON O. Cross-validation of geo-electrical and hydrogeological models to evaluate seawater intrusion in coastal aquifers [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34 (10) : 104-120.
- [19] MAILLET G M, RIZZO E, REVIL A, et al. High resolution electrical resistivity tomography (ERT) in a transition zone environment: application for detailed internal architecture and infilling processes study of a Rhône River Paleo-channel [J]. Marine Geophysical Researches, 2005, 26 (2/3/4) : 317-328.
- [20] 赵书泉, 徐军祥, 李培远, 等. 高密度电法在莱州湾东南岸海水入侵监测中的应用 [C]// 中国地质调查局水文地质环境地质部. 海岸带地质环境与城市发展研讨会论文集. 天津: 中国地质灾害与防治学报, 2004.
- [21] 付腾飞. 滨海典型地区土壤盐渍化时空变异及监测系统研究应用 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [22] 李福林, 张保祥. 水化学与物探定量指标在海水入侵监测中的应用 [C]// 山东省科学技术协会. 山东水利学会第二届青年科技工作者学术研讨会论文汇编 (上册). 济南: 山东省水利协会, 1998.
- [23] 李福林, 陈学群, 张奇. Gamma 测井系统在山东莱州海水入侵监测中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2007, 34 (5) : 90-93. (LI Fulin, CHEN Xuequn, ZHANG Qi. Application of Gamma logging to sea water intrusion monitoring in Laizhou, Shandong [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34 (5) : 90-93. (in Chinese))
- [24] 佟雪. 大沽河咸水入侵电阻率法监测技术研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

47-52. (in Chinese))

[21] 沈会涛,刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析 [J]. 湖泊科学,2008,20(6):773-779. (SHEN Huitao,LIU Cunqi. Potential correspondence analysis of phytoplankton communities and environmental factors in Baiyangdian Lake [J]. Lake Science,2008,20(6):773-779. (in Chinese))

[22] 谢永红,李春永,杨中兰. 阳宗海浮游生物群落结构研究 [J]. 水资源保护,2015,31(4):47-51. (XIE Yonghong,LI Chunyong,YANG Zhonglan. Research on plankton community structure of Yangzonghai Lake [J]. Water Resources Protection,2015,31(4):47-51. (in Chinese))

[23] 陈晓江,杨劼,杜桂森,等. 海子水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子 [J]. 水资源保护,2015,31(6):122-127. (CHEN Xiaojiang,YANG jie,DU Guishen, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and its driving factors in Haizi Reservoir [J]. Water Resources Protection,2015,31(6):122-127. (in Chinese))

[24] 陈长平,高亚辉,林鹏. 深圳福田红树林保护区浮游植物群落的变化及其生态学研究 [J]. 厦门大学学报(自然科学版),2005,44(增刊1):11-15. (CHEN Changping,GAO Yahui,LIN Peng. Seasonal variation of phytoplankton community and its ecology in Futian mangrove forest, Shenzhen [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition),2005,44(S1):11-15. (in Chinese))

[25] 陈长平. 闽粤沿海几个红树林区硅藻的生态分布和6种重金属对底栖硅藻胞外产物的影响 [D]. 厦门:厦门大学,2004.

[26] 盛海燕,虞左明,韩轶才,等. 亚热带大型河流型水库:富春江水库浮游植物群落及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学,2010,22(2):235-243. (SHENG Haiyan,YU Zuoming,HAN Yicai, et al. Phytoplankton community in Fuchunjiang reservoir and its relationship with environmental factors in subtropical large-scale river reservoir Lake Science [J]. Lake Science,2010,22(2):235-243. (in Chinese))

[27] 蒋玉玲,李青,陈晓宏,等. 广州市大金钟水库浮游植物与环境因子的关系 [J]. 水资源保护,2011,27(1):46-50. (JIANG Yuling,LI Qing,CHEN Xiaohong, et al. Relationship between phytoplankton and environmental factors in Dajinzhong reservoir of Guangzhou [J]. Water Resources Protection,2011,27(1):46-50. (in Chinese))

[28] VOLLENWEIDER R A. Elemental and biochemical composition of plankton biomass; some comments and explorations [J]. Archiv Fur Hydrobiologie,1985,105(1):11-29.

(收稿日期:2017-04-30 编辑:彭桃英)

+++++

(上接第101页)

[25] 路剑飞,甘华阳,张顺枝,等. 琼东北滨海浅层地下水水质变化特征分析 [J]. 中山大学学报自然科学版,2016,55(1):137-148. (LU Janfei,GAN Huayang,ZHANG Shunzhi, et al. Analysis of water quality fluctuations in coastal shallow groundwater at NE Hainan [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2016,55(1):137-148. (in Chinese))

[26] 余海忠,冯书才,曾奇. 采用物探方法研究深圳西部海水入侵现状 [J]. 山西建筑,2015(14):56-58. (YU Haizhong,FENG Shucai,ZENG Qi. Analysis in coastal soft soil foundation treatment method [J]. Shanxi Architecture,2015(14):56-58. (in Chinese))

[27] 王凤和,孙洪梅. 电导仪法在海水入侵监测分析中的应用 [J]. 吉林水利,2007(12):30-31. (WANG Fenghe,SUN Hongmei. Application of conductance instrument in the sea water inbreak monitoring analysis [J]. Jilin Water Resources,2007(12):30-31. (in Chinese))

[28] 苏乔,彭昌盛,徐兴永,等. 基于高密度电法的潮汐作用对潍坊滨海地下水影响分析 [J]. 海洋环境科学,2015,34(2):286-289. (SU Qiao,PENG Changsheng,XU Xingyong, et al. The application of high density resistivity method to analysis the impact of tide on water table fluctuation in coastal aquifer [J]. Marine Environmental Science,2015,34(2):286-289. (in Chinese))

[29] 张长宽,陈欣迪. 海岸滩涂资源的开发利用与保护研究进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33. (ZHANG Changkuan,CHEN xindi. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(1):25-33. (in Chinese))

[30] 冯锐,李智明,李志武,等. 电阻率层析成像技术 [J]. 中国地震,2004,20(1):13-30. (FENG Rui,LI Zhiming,LI Zhiwu, et al. Resistivity Tomography [J]. Earthquake Research in China,2004,20(1):13-30. (in Chinese))

[31] BARKER R. Signal contribution sections and their use in resistivity studies [J]. Geophysical Journal International,1979,59(1):123-129.

(收稿日期:2017-11-09 编辑:徐娟)