高密度电法在雷州半岛东部海岸带综合地质调查中应用

李先锋 张德程* 郑立龙
中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心，山东 烟台 264000

[摘要]介绍了应用高密度电法在雷州半岛东部海岸带综合地质调查中的具体应用案例。工作区位于沈海高速以东，范围主要包括湛江市四区、雷州市东北部及沿岸线的陆域，面积 5280km²。通过在工区开展的 21 条高密度电法剖面测量，根据不同地质体呈现的电性差异或异常特征，结合地质资料综合分析得到：湛江市湖光湖景区周边地下赋存厚层破碎玄武岩，富含地下水；霞山区海岸线周边地区海水入侵较为严重，入侵程度与海岸线距离紧密相关，入侵距离远至约 400m；湛江市东海岛内陆地区地下富含淡水水层，海岸线周边地区海水入侵较为严重，入侵程度与海岸线距离紧密相关，入侵深度深至 140m 及更深，入侵距离远至约 1000m。高密度在本区探测岩体富水性、查明海水入侵程度及咸淡水界面的有效性得到验证，为相近海岸线地质调查项目提供了重要参考价值。

[关键词]高密度电法；海岸带地质调查；富水性；咸淡水界面；雷州半岛
DOI：10.33142/aem.v5i4.8388 中图分类号：P627 文献标识码：A

Application of High-density Electrical Method in Comprehensive Geological Survey of Coastal Zone in the East of Leizhou Peninsula

LI Xianfeng, ZHANG Decheng*, ZHENG Lilong
Yantai Coastal Zone Geological Survey Center of China Geological Survey, Yantai, Shandong, 264000, China

Abstract: The specific application case of high-density electrical method in the comprehensive geological survey of the eastern coastal zone of Leizhou Peninsula is introduced. The work area is located east of the Shenhai Expressway, mainly including the four districts of Zhanjiang City, the northeast of Leizhou City, and the land area along the coastline, with an area of 5280 km². Through 21 high-density electrical profile measurements conducted in the work area, and based on the electrical differences or abnormal characteristics presented by different geological bodies, combined with comprehensive analysis of geological data, it is found that there is a thick layer of broken basalt in the surrounding area of Huguang Lake Scenic Area in Zhanjiang City, rich in groundwater; The seawater intrusion in the surrounding areas of the coastline in Xiashan District is relatively severe, and the degree of intrusion is closely related to the distance between the coastline, with intrusion distances as far as about 400m; The inland area of Donghai Island in Zhanjiang City is rich in freshwater aquifers underground, and seawater intrusion is more severe in the surrounding areas of the coastline. The degree of intrusion is closely related to the distance from the coastline, with invasion depths as deep as 140m and deeper, and invasion distances as far as about 1000m. The effectiveness of high-density detection of rock mass water abundance, identification of seawater intrusion degree, and saltwater interface in this area has been verified, providing important reference value for geological survey projects of similar coastlines.

Keywords: high-density electrical method; coastal geological survey; water abundance; salt and fresh water interface; Leizhou Peninsula

引言

海岸带具有重大的战略与经济价值，科学统筹海岸带的开发利用与综合保护对促进沿海经济的可持续发展意义深远，因此需要加强对海岸带的综合地质调查与研究[1-2]。近年来，中央和地方对海岸带地质调查工作的关注与投入力度不断加大，在基础地质和资源地质调查、地质灾害与海洋侵蚀调查、海岸带地球系统科学研究等领域取得了重要进展，为推进生态文明建设与地质转型升级树立了良好典型[3-6]。

雷州半岛东部海岸带综合地质调查项目属于重要经济区和城市群综合地质调查计划，范围主要包括湛江市四区和雷州市东北部及沿岸线外推 30km 的近岸海域，总面积约 10580km²，其中陆域面积 5280km²。陆域主要进行地质体结构特征、海岸带地下水特征及海水入侵情况的调查。高密度电法具有横垂向分辨率高、地电信息丰富、快速高效等优点，国内专家学者也开展过高密度电法在地层划分、海水入侵分布等方面的广泛深入研究[7-10]，认为高密度电法确定的咸淡水界位置准确有效，可以作为大范围咸水入侵监测的主要手段[11]。

通过在工区布设的 21 条高密度电法剖面测量（GM001～GM021），结合已知地质资料综合分析：基本查明了湛江市湖光湖景区周边地下玄武岩的富水特征、霞山区海岸线周边地区海水入侵分布、湛江市东海岛内陆地区的地下水及海水入侵分布等情况，为雷州半岛东部海岸带

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

后续的地质工作提供依据。

1 测区概况及地质地球物理特征

1.1 自然地理概况

湛江位于中国大陆南端、广东省西南部，包括整个雷州半岛及半岛北部的一部分。东濒南海，南隔琼州海峡与海南省相望，西邻北部湾，西北与广西壮族自治区毗邻。市区位于雷州半岛东北部。湛江的陆地大部分由半岛和岛屿组成，地势大致是中轴高，东西两侧低，南北高而中间低，起伏和缓，多为平原和台地，以北部廉江县境内的双峰嶂（384m）为最高点。湛江既有热带土壤基本类型，也有滨海地带土壤分布，共有赤红壤、砖红壤、滨海沙土、滨海艳子沼泽土、滨海盐土、潮沙泥土、沼泽土、火山灰土、菜园土、水稻土等 10 个土类，以红壤居多，湛江因此有“红土地”之称。其分布大体是北纬 20° 40’以南地区为砖红壤，占土地总面积一半以上，是该市最主要的土壤类型；北纬 20° 40’以北地区为赤红壤；沿海地区为滨海沙土、滨海盐渍沼泽土和滨海盐土；九洲江和鉴江沿岸两侧为潮沙泥土。湛江市自然植被类型主要为热带雨林-季雨林，其次为稀疏灌木草原和红树林。植物的科属种类丰富，可划分出 6 种植被群落：雨季乔木群落、稀树灌木群落、多刺灌木群落、红树灌木群落、稀树中草原和沙荒草原。湛江地处北回归线以南的低纬地区，属于热带北缘季风气候，终年受海洋气候的调节，冬无严寒，夏无酷暑，年平均气温在 22.7C-23.5C，由北向南递增，南北相差 1.5C。年平均雨量 1395.5-1723.1 毫米，年平均日照时数 1714.8-2038.2 小时。4-9 月多为雨季，8 月雨量最多；10-3 月份雨量较少。低压、热带风暴、台风登陆影响较为频繁。湛江境内河流众多，但大部分源流短，水量小，落差不大。全市集水面积大于 1000 平方公里的有鉴江、九洲江、南渡河、遂溪河；集水面积大于 100 平方公里的干支流有 40 条；属独流入海的 22 条。

1.2 区域地质背景

区内除东部和南部有中、新生界大面积分布外，主要由古生界寒武系和泥盆系地层组成。缺失志流系、三叠系和侏罗系，其余分布零星，出露面积有限。寒武系地层在全区均较为发育，大部分经受不同程度的区域变质作用及混合岩化作用，总厚度大于 2977.7m。泥盆系地层由浅海相、滨海相、陆相及海陆交互相的砂页岩、灰岩夹赤铁矿、铅锌矿等组成。总厚度大于 2876m。第四系主要分布在东部与南部，主要由砾石、砂砾、砂质黏土等组成。

本区处于粤桂隆起的南西端。根据沉积建造，构造变动，岩浆活动及变质作用，可划分为加里东构造阶段、华力西—印支构造阶段、燕山构造阶段、喜山构造阶段。

区内岩浆岩比较发育，分布广泛。以中—酸性侵入岩为主，次为基性—酸性喷出岩。侵入岩以花岗岩、二长花岗岩为主，次为花岗闪长岩、石英二长岩等；喷出岩有霏细斑岩、安山玢岩等。

1.3 水文地质条件

区内地势平坦，降雨地表流失小，多下渗补给地下水，降雨是地下水主要补给来源。另外由于山塘、水库、明渠暗沟等的渗漏是地下水的另一主要来源。本区含水层主要为下更新统湛江组及上第三系下洋组各种砂层，其中以广泛分布的中、粗砂、含砾粗砂为主，细、粉砂次之，个别地段有砾石层。亚砂土和亚黏土层具有弱含水性和弱渗透性，但分布并不普遍。

1.4 地球物理特征

本区砂层电性主要是受地下水矿化度的控制，其次是岩性的影响。据前人研究，电阻率数值与矿化度值成反比关系，即电阻率随矿化度值的增高而降低，矿化度值越高，电阻率值越低；反之，矿化度值越低，电阻率值越高。

本区咸淡水矿化度差别很大，因而电性上的差异也较明显，为划分淡水砂层和咸淡水界线提供了良好的地球物理前提。淡水砂层为高电阻率特征，视电阻率一般在 80～180Ω·m，个别地方高达数百Ω·m，高于黏土层 3～5 倍以上；亚砂土和亚黏土层视电阻率值介于砂层和黏土之间；咸水砂层电阻率数值与黏土层接近，一般为 2～20Ω·m，为明显低电阻率特征。

2 高密度电法

2.1 方法原理

高密度电法测量原理和传统直流电法相同，电阻率 ρ_s 也遵循普通电阻率方法的公式，其改进优化点在于将电剖面与电测深集成为阵列式。根据前人研究成果表明，温纳装置的横向和垂向分辨率都相对较好，本工区高密度方法选用温纳装置，方法原理见图 1。

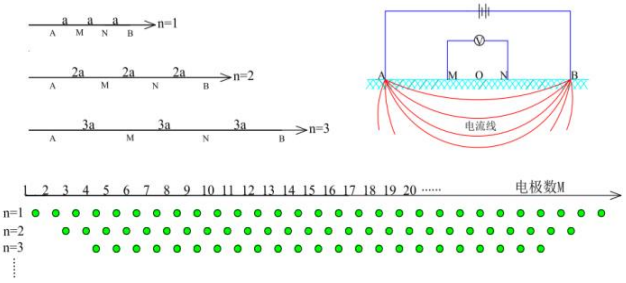


图 1 温纳装置工作原理示意图

2.2 仪器参数

本次测地采用 GPS 与测绳结合的办法进行量，用 GPS 定位测线端点及拐点，用测绳具体定位每两个 GPS 端点之间的每个实测点，整体测量精度控制在 0.5m 范围内。本次高密度电法采用仪器为武汉捷探科技有限公司生产的 GT—CEW 型常规电法工作站及专用电缆设备。高密度野外施工采用 120 个电极组合的装置进行测量，点距 10m。共布设 21 条高密度电法剖面，测线长度 600m～1900m，长测线采用滚动测量。

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

2.3 数据处理

经现场采集得到剖面原始视电阻率后，导入高密度电阻率数据进行删除突变点，设置反演参数后，选择最小二乘法进行最优化反演，根据其收敛情况决定反演结果，以固定格式保存，最后再利用 surfer 8 绘制高密度电阻率反演断面图。最后结合已知地质资料，对反演断面图反映的电性层分布及异常体进一步综合解译。

3 成果解译

本次工作主要分为湛江市湖光湖景区周边、霞山区海岸线周边地区、湛江市东海岛内陆地区三个重点调查区，从电阻率等值线断面图看，从浅到深，电阻率是浅部为相对较低（地表为沙层的地段表层呈高阻显示），中深部海水侵入区则更低，深部电阻率值相对较高（深部含水层呈低阻显示），具有明显的分带性；从横向上看，浅部电阻率值变化范围较小，中、深部电阻率值变化相对较大，局部存在高阻不均匀体。由电阻率的大小、等值线的分布规律和本区地下地层的地质特征，可较明显地分析第四系覆盖层的厚度、地下含水层特征和咸水区分布。我们于每个调查区选择一条典型高密度电法剖面具体展开。

3.1 湛江市湖光湖景区周边

GM002 线位于湛江市湖光湖景区西北方向，地势较平，由西南向东北布设，测线长 1200m，从测线高密度电阻率法反演成果图来看，GM002 线反演剖面在纵向上可以大致划分为两层。第一层在深度 20m 以浅的范围内，电阻率值相对较低，电阻率值相对变化较大，推断浅部主要为第四系覆盖且含水导致；第二层在 20-140m 深度范围，电阻率值变化较大，剖面左侧电阻率值较高，右侧电阻率值较低，推断剖面左侧高阻异常主要为玄武岩，右侧多个低阻异常为地层含水较多导致（图 2）。

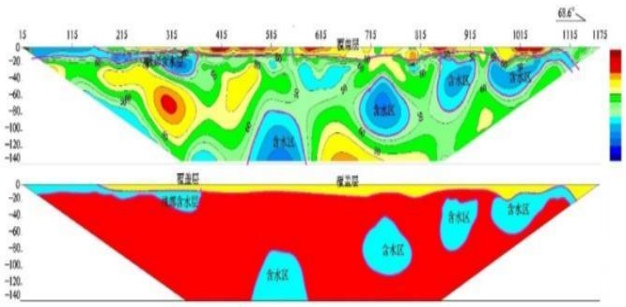


图 2 GM002 电阻率反演断面图

3.2 霞山区海岸线周边地区

GM009 线位于湛江市霞山区宝满村东侧，地势平坦，由西北向东南布设，测线长 700m，从测线高密度电阻率反演成果图来看，GM009 线反演剖面电阻率值相对较低，电阻率值变化相对较大，推断 GM009 线剖面为含水层，横坐标 200 点左侧电阻率值高于 20Ω·m，推断为淡水区，右侧电阻率值低于 20Ω·m，推断为海水入侵造成的咸化区（图 3）。

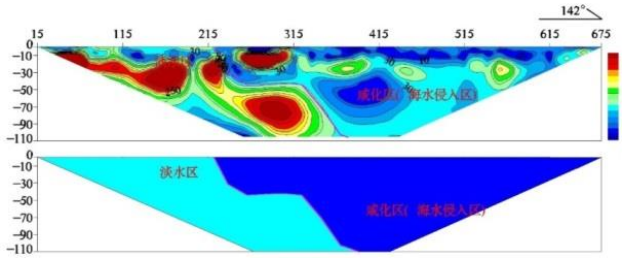


图 3 GM009 电阻率反演断面图

3.3 湛江市东海岛内陆地区

GM021 测线位于湛江市东海岛新村东北侧附近，地势平坦，由南向北布设，测线长 600m，从测线高密度电阻率反演成果图来看，GM021 线反演剖面在纵向上可以大致划分为三层，第一层，坐标 400 点右侧，在深度 20m 以浅的范围内，电阻率值相对较高，电阻率值变化相对较大，推断浅部为第四系覆盖层；第二层，深度 60m 以浅范围内，电阻率值相对较低，电阻率变化相对较小，推断为含水层，含水层电阻率值低于 20Ω·m，推断为咸化区；第三层深度 60m 以深范围内，电阻率值相对较低，电阻率变化相对较小，推断为含水层，含水层电阻率值高于 20Ω·m，推断为淡水层（图 4）。

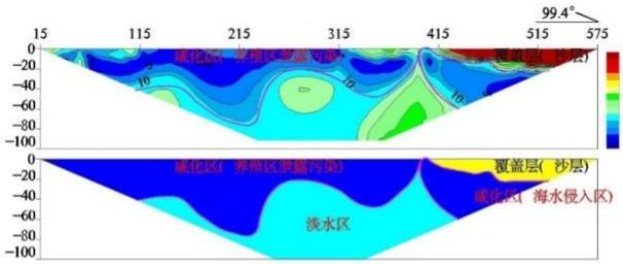


图 4 GM021 电阻率反演断面图

4 结论

（1）湛江市湖光湖景区附近地下赋存厚层的玄武岩，玄武岩岩层较为破碎，破碎带内富含地下水。

（2）霞山区海岸线周边地区存在较为严重的海水入侵现象，海水入侵距离最远可达 400m 左右，越靠近海岸线，海水入侵现象越严重。

（3）湛江市东海岛内陆地区地下富含淡水水层，在海岸线周边地区地下海水入侵情况较为严重，海水入侵可深达地下 140m 甚至更深的深度，海水入侵距离最远达到 1000m 左右，越靠近海岸线，海水入侵现象越严重。

[参考文献]

[1]郝爱兵，林良俊，陈斌.陆海统筹推进海岸带地质调查[J].水文地质工程地质，2017，44(3)：3.
[2]李彦瑞.基于可持续理念的海岸带空间整合与优化研究[D].天津：天津大学，2020.
[3]肖国强，王福，印萍，等.我国海岸带地质调查工作回顾与展望[J].华北地质，2022，45(1)：92-100.
[4]李少伟，缪雄谊，丁喜桂，等.辽河三角洲海岸带环境地

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

质与调查研究[J].海洋地质前沿,2013,29(9):37-44.
[5]尤再进.中国海岸带淹没和侵蚀重大灾害及减灾策略[J].中国科学院院刊,2016,31(10):1190-1196.
[6]吴立新,荆钊,陈显尧,等.我国海洋科学发展现状与未来展望[J].地学前缘,2022,29(5):1-12.
[7]牛真茹,李飞飞,袁霆,等.高密度电法与钻探法点面结合综合探查场地填埋层空间分布特征[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(2):79-86.
[8]陶毅,曾庆仕,漆剑.高密度电法在岩溶流域沉积地层岩性划分中的应用——以广西贺江岩溶流域为例[J].南方国土资源,2021(11):42-48.
[9]徐喆,杨娇娇,刘荣波,等.基于高密度电法的滨海地区地下淡水体识别[J].海洋地质前沿,2022,38(6):47-53.
[10]孙建宏,程立群,赵伟锋,等.海水入侵区视电阻率与氯离子浓度关系研究——以秦皇岛地区为例[J].物探与化探,2022,46(2):518-524.
[11]陈学群,李成光,田婵娟,等.高密度电阻率法在咸水入侵监测中的应用[J].物探与化探,2021,45(5):1347-1353.
[12]李新斌,田辉,丁廉超,等.基于高密度电法的岩溶储水构造识别[J].工程地球物理学报,2022,19(1):35-42.
作者简介：李先锋（1996-），安徽省灵璧县，山东科技大学，地质工程，中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心，助理工程师，从事海洋物探与海岸带综合地质调查研究；通讯作者：张德程（1995-），籍贯山东烟台，本科，从事海岸带综合地质调查研究。

Copyright © 2023 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.