

引用格式: 韩冬梅, 曹国亮, 蔡砥柱, 等. 基于高密度电测法的西沙东岛地下淡水透镜体识别[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 635–646. [Han D M, Cao G L, Cai D Z, et al. Using electrical resistivity tomography method to investigate fresh groundwater lenses on Dong Island, China[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 635–646.] DOI: 10.18402/resci.2024.03.15

基于高密度电测法的西沙东岛地下淡水透镜体识别

韩冬梅^{1,2,3}, 曹国亮^{4,5}, 蔡砥柱¹, 宋献方^{2,3}, 邢子浩¹, 孟庆杰¹

(1. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 571127; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国地质大学(北京)水利部地下水保护重点实验室(筹), 北京 100083; 5. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要:【目的】珊瑚岛地下淡水透镜体是维持岛上居民生产生活、生态涵养所必需的重要资源。准确识别珊瑚岛地下淡水透镜体的形态, 揭示地下淡水补给机制, 是珊瑚岛地下水资源评价的重要基础, 对实现科学管理海岛地下水资源至关重要。【方法】本文以西沙群岛的东岛为研究对象, 结合水文地质调查, 对高密度电阻率法实测剖面数据进行反演解译, 基于电阻率和地下水总溶解固体浓度关系识别了咸淡水界面。【结果】①根据高密度电阻率法反演电阻率首次识别了西沙东岛地下淡水透镜体发育特征, 该方法在西沙珊瑚岛具有较好的适用性; ②东岛淡水透镜体主要发育于岛屿西北和南侧沙堤, 厚度较薄, 仅3~7 m, 局部地区甚至无地下淡水; ③东岛地下咸淡水界面形态说明沙堤以内植被根系吸水是造成淡水透镜体较薄的主要原因, 植被分布对东岛地下淡水资源具有重要影响。【结论】在保护西沙珊瑚岛生态系统的前提下, 适当减少人工椰树林种植面积, 可有效增加岛屿降雨形成的地下淡水资源, 有利于发挥珊瑚岛地下淡水透镜体对岛屿水安全的保障作用。

关键词: 珊瑚岛; 淡水透镜体; 高密度电法; 咸淡水界面; 西沙东岛

DOI: 10.18402/resci.2024.03.15

1 引言

珊瑚岛受降水入渗形成的地下淡水, 由于密度差浮于海水之上, 形成中间厚、边缘薄的淡水体, 被称为“淡水透镜体”^[1,2]。地下淡水透镜体是支撑珊瑚岛居民生产生活、维持珊瑚岛生态涵养所必需的淡水来源, 对土壤淡化和岛屿绿化过程起关键作用^[3]。天然条件下, 珊瑚岛上的地下淡水透镜体主要受到降雨补给、植被蒸散发、地下淡水储存结构和储存能力、珊瑚岛边缘的水力损失、潮汐、以及与下伏海水的混合等影响^[4–6]。在低洼地或植被覆盖地带大量的地下水因埋深较浅会通过蒸散发或植被吸收而被消耗^[7,8]。珊瑚岛地下淡水透镜体及其

所赋存的含水层性质, 加之频繁的自然和人类活动干扰, 使得珊瑚岛成为世界上最脆弱的含水层系统之一。准确识别珊瑚岛淡水透镜体的形态和分布特征, 对评估珊瑚岛上地下淡水资源量, 提升珊瑚岛地下水水文过程及其脆弱性的认知水平, 更好地开展珊瑚岛地下水资源管理都至关重要^[8,9]。这也是关乎珊瑚岛居民和生态环境保护及水安全问题的重要基础。

利用地下水监测井对地下水水位、水化学–环境示踪剂进行采样分析是研究含水层中咸淡水界线分布的传统方法, 但受调查和观测点密度影响, 难以高精度刻画三维咸淡水界面特征^[10–12]。而物探

收稿日期: 2023-05-04 修订日期: 2023-10-11

基金项目: 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心地质调查专项(DD20211554)。

作者简介: 韩冬梅, 女, 新疆焉耆人, 博士, 研究员, 研究方向为滨海水循环与水环境。E-mail: handm@igsnr.ac.cn

通讯作者: 蔡砥柱, 男, 湖南益阳人, 工程师, 研究方向为海洋地质。E-mail: snailiron@foxmail.com

方法对咸淡水密度差及水动力变化引起的地下电导率差异非常敏感,非常适合用来调查滨海含水层的非均质性及咸淡水界面形态。主要包括航空电磁法(AEM)^[13],连续电断层影像(CERT)^[14],延时电阻率层析成像(TL-ERT)^[15,16],电阻率层析成像(ERT)^[17-20]和垂向电测深(VES)^[21-23]等。地球物理方法具有非破坏性、低成本、高效率的特点,可在陆海交互带很大范围内获取地下电阻率的连续分布数据,有助于准确刻画调查区范围内非均匀性特征。这些方法已成为滨海水文地质条件调查的主流方法,广泛应用于调查海水和地下水相互作用的动力过程、咸淡水界面特征,以及评估海岛淡水透镜体位置和厚度、咸淡水过渡带的形态等^[24-27]。这类方法也往往需要结合水文地质模型、地球化学特征、地下水数值模型等判断近岸含水层中地下水咸化程度^[28-31]。然而,对于物探电测法获取的数据解译,很少有综合考虑珊瑚岛礁的水文地质条件和植被变化特征进行岛礁地下水补给特征研究的。

随着中国在南海建设生态宜居岛屿的步伐加快,珊瑚岛地下淡水的重要性不言而喻,需求与日俱增。然而,珊瑚岛地下淡水易受风暴潮、过度开采、污染等自然和人为因素威胁,水源性和水质性缺水问题凸显。珊瑚岛能否形成淡水透镜体及如何进行可持续开发利用,是准确评价岛礁地下淡水资源的重要内容,也是关乎南海珊瑚岛向生态岛、宜居岛转变的核心问题,具有重要的科学意义和应用价值。本文以西沙群岛第二大岛——东岛为研究对象,结合水文地质调查,应用高密度电阻率法查明东岛典型剖面的淡水透镜体分布特征,识别咸淡水界面形态,分析其分布特征与东岛地形和植被特征的关系。研究结果可为珊瑚岛地下淡水资源的合理开发利用和保护提供重要参考。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

东岛是西沙群岛东部宣德群岛东岛环礁中的岛屿,位于永兴岛东南约50 km。该岛呈长方形,周围有沙堤环绕,中部地势低洼,整体面积为1.7 km²。东岛气候属热带海洋气候,岛上目前未建气象观测站。距东岛最近的永兴岛气象站观测年平均降水量为1546 mm,但降雨量季节分配不均匀,存在明显的干季和湿季,雨季集中在6~11月,雨量为1236 mm,

占全年雨量的80%,其余月份为干季,雨量为310 mm。东岛的地层岩性主要有珊瑚贝壳砾岩、珊瑚贝壳中砂岩、珊瑚贝壳中粗砂、珊瑚贝壳中细砂,中部分布有鸟粪层,靠近海边界分布有珊瑚礁砾石、珊瑚礁岩块及现代原生珊瑚礁等。岩性结构松散,渗透性强,长历时强降雨可以形成短暂性、短流路的地表径流,一般情况无法形成地表径流,降雨形成的天然地表水在东岛低洼地区形成季节性间歇积水,使潟湖淡化,成为岛上黄牛群饮用水源地,渔民称之为“牛塘”。东岛的潟湖形成时间较长,面积较大,封闭性良好,主要靠大气降水补给,矿化度低。

东岛所在的西沙群岛海域潮汐类型为全日潮,潮差一般小于2 m。冬季盛行东北风,夏季盛行西南风。季风影响下,西沙群岛冬季盛行偏北浪,夏季盛行偏南浪。

东岛作为西沙群岛的第二大岛,岛上植被为珊瑚岛热带常绿林,绿化覆盖率达95%以上(图1)。东岛优势物种是白避霜花(麻枫桐),植被具有乔木-灌木-草被分层结构,岛屿南岸以抗风且能在沙壤土生长的草海桐为主,北岸为珊瑚礁海滩岩,以水荬花为主^[32],岛西南还有人工种植的椰树林。淡水是珊瑚岛植被生长的前提条件,岛屿植被的出现是珊瑚灰沙岛接受大气降水淋滤发生土质脱盐,进

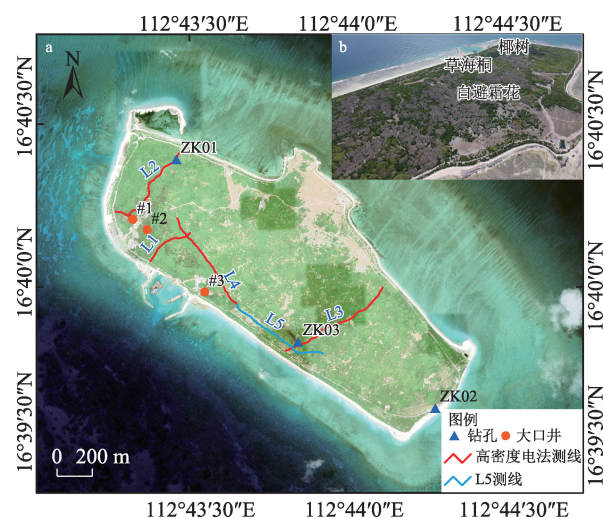


图1 钻探与物探工作部署图(a)与东岛无人机航拍照片(b)
(L1, L2, L3, L4, L5分别为5条探测剖面位置对应的编号)

Figure 1 Location map of drilling and geophysical survey profiles (a) and aerial photograph of Dong Island taken by a drone (b) (L1, L2, L3, L4, and L5 are the numbers corresponding to the positions of the five geophysical survey profiles.)

2024年3月

而积存地下淡水开始形成比较稳定淡水体的标志,也标志着珊瑚礁景观演化开始进入其发育史的顶级阶段^[33]。东岛有“鸟岛”之称,1981年被划为鹭鸟自然保护区,具有完整的岛屿陆地生态系统。作为典型的珊瑚岛,地下淡水对于东岛景观发育演化以及支撑海岛生态系统都发挥了至关重要的作用。

2.2 研究方法

2.2.1 高密度电法测线布设

高密度电阻率法(高密度电法)工作原理与常规电阻率法基本相同,是以岩土体的电性差异为基础的一种电探方法,根据在施加电场作用下地中传导电流的分布规律,推断地下具有不同电阻率地质体的赋存情况及咸淡水界面位置。实际测量中,受到道路、地形、地貌、植被分布等因素影响,选用的电极数目根据线路各分段长度而变。本次探测由海口地质调查中心工作人员2022年9月中旬登岛实施,布设了L1(长度300 m)、L2(长度600 m)、L3(长度700 m)、L4(长度800 m)、L5(长度600 m)共5条高密度电法测线(图1),使用XSD3D高密度电测仪,分别采用偶极-偶极、温纳两种测线布设方式(电极距均为5 m)进行了高密度电阻测量。

2.2.2 电阻率反演

数据处理使用Res2dinv软件进行反演,Res系列软件是由M.H. Loke博士设计编写的用于处理激发极化数据的二维、三维反演软件^[34]。该软件使用快速最小二乘法对数据进行反演,在保证反演结果质量的前提下,大大缩短了反演所需时间。本文采用Robust模型反演方法,并且由于剖面浅层和深层电阻差异显著,对反演采用的差分网格进行了加密,测量电极距为5 m,反演过程中网格水平方向细化剖分为2.5 m。其他反演参数采用Res2dinv软件的默认设置。

2.2.3 基于电阻率分布识别咸淡水界面

根据Archie公式,饱含咸水的砂土电阻率为^[29]:

$$\rho = \rho_w \frac{\alpha}{\phi^m} \quad (1)$$

式中: ρ 为饱含咸水的砂土电阻率; ρ_w 为咸水的电阻率; α 、 ϕ 和 m 为表征岩性特征的3个无量纲参数,分别为孔隙曲折系数、孔隙度和胶结系数。Archie公式为针对砂岩的经验公式,将其应用于珊瑚岛的珊瑚砂和礁灰岩地层时,需要根据地层岩性对3个

参数进行调整。例如,Comte等^[29]对新喀里多尼亚Mba岛淡水透镜体研究中,识别出3个参数值分别为1、0.2和1.3。周从直等^[36]采用物探调查永兴岛淡水透镜体研究中,3个参数取值分别为1、0.28和1.5。

咸水的电导率与盐分浓度呈线性关系:

$$C = \beta \sigma_w \quad (2)$$

式中: C 为咸水总溶解固体(TDS)浓度(mg/L); σ_w 为咸水的电导率($\mu\text{S}/\text{cm}$),电导率和电阻率关系为 $\sigma_w = 1/\rho_w$;海水的浓度和电导率换算系数 β 为0.6,淡水为0.5,对于咸水可取0.55。

根据咸水的电导—盐分浓度关系和Archie公式,本文 α 、 ϕ 和 m 的取值为1、0.28、1.3,可计算出咸淡水界面(1 g/L)对应的饱含咸水的砂土电阻率为 $28.7 \Omega \cdot \text{m}$ 。在西沙永兴岛进行的高密度电法探测淡水透镜体研究中,采用 $30 \sim 35 \Omega \cdot \text{m}$ 电阻率(对应于含NaCl浓度为988 mg/L的饱水砂土的电阻率 $32.3 \Omega \cdot \text{m}$)作为咸淡水分界面,取得了比较好的探测识别效果^[36]。结合西沙其他岛礁的钻探、地质调查资料根据视剖面电阻率的分布变化特征,本文将 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 电阻率等值线作为咸淡水界面对淡水透镜体底界深度进行解译识别。

根据永兴岛的物探调查,干珊瑚砂的电阻率在 $300 \sim 500 \Omega \cdot \text{m}$ ^[35]。Comte等^[29]利用高密度电法进行珊瑚岛淡水透镜体调查认为电阻率高于 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 则为非饱和珊瑚砂。根据永兴岛雨水水化学特征分析,西沙群岛雨水TDS浓度存在明显的季节差异,在 $15 \sim 220 \text{ mg/L}$ 范围内波动,根据Archie公式计算对应雨水TDS浓度饱含淡水的珊瑚砂电阻率为 $130 \sim 1900 \Omega \cdot \text{m}$ 。但本次调查工作未能获取东岛潜水面处地下水TDS浓度分布,尚无法基于电阻率确定淡水透镜体顶面(地下水潜水面)位置。

3 结果与分析

3.1 实测电阻率特征

图2显示了5条测线的实测数据剖面。高密度电法测量获得的电阻率正常情况下应该是渐变的,但从剖面实测电阻率可以看出,测量数据畸变点较多,稳定性较差。特别是L2、L3和L4测线出现数条斜向剖面右下角的高阻异常条带,形成该电阻异常的原因应与电极接地条件较差有关。测线布设过程中,在L2测线距离200 m、L3测线距离300 m、L4

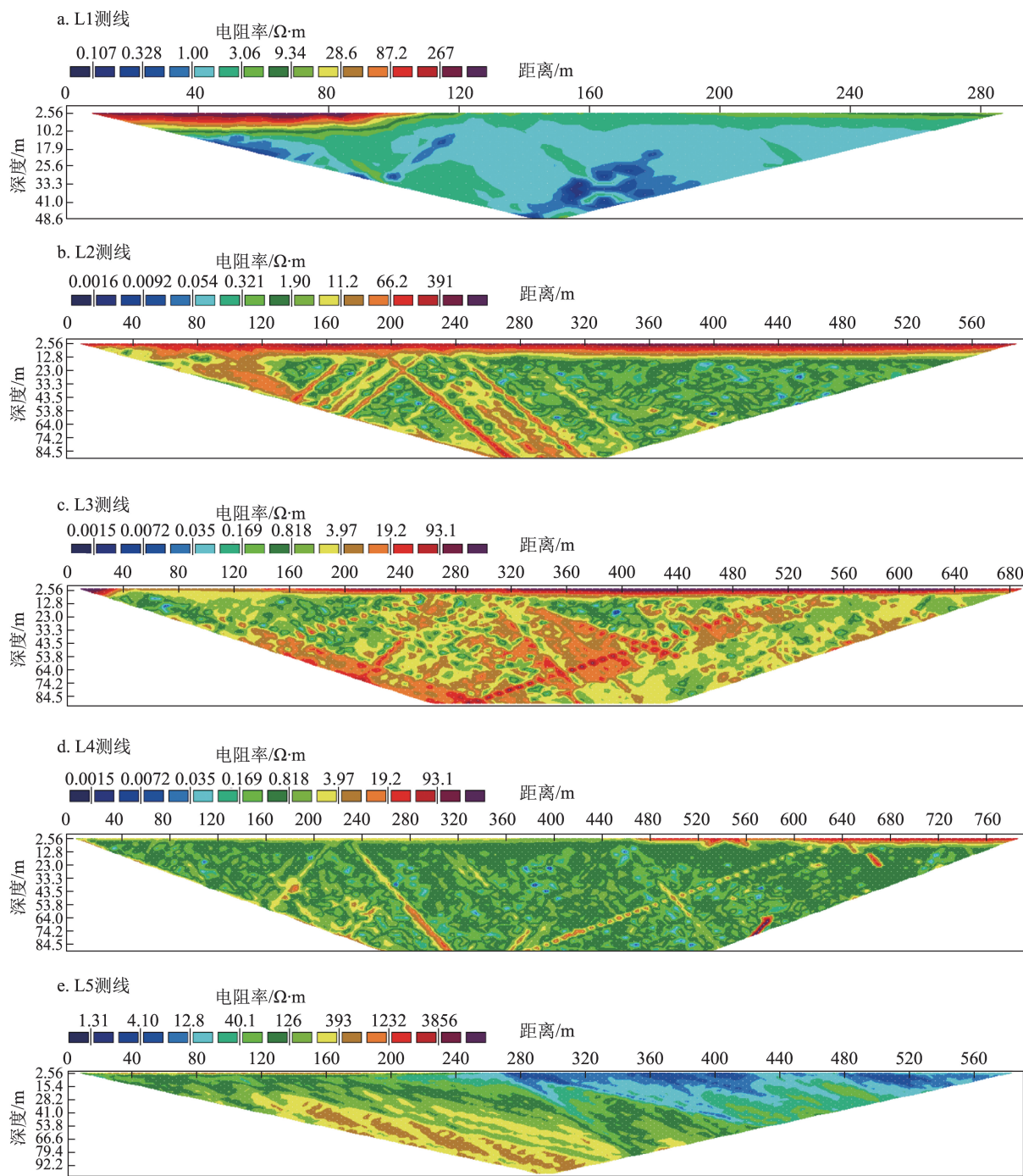


图2 高密度电测仪温纳法测量电阻率分布

Figure 2 Resistivity distribution based on the Wenner method using high-density electrical resistivity meter

测线距离220 m附近可能出现了电缆或者开关断开问题。但在测量过程中由于实际条件限制未能进行复测。总体上,剖面浅层10 m以浅深度内存在明显的高阻区,剖面深层电阻率显著降低,但珊瑚砂和礁灰岩地层未显示出明显的电阻差异。由于海/咸水浸泡中的珊瑚岛地层结构和岩性电阻分层表

现不明显,高密度电法在珊瑚岛的地质分层效果较差^[36]。但本文重点是利用高密度电法识别珊瑚砂地层内的咸淡水界线,需要探测识别的是珊瑚砂地层内高阻淡水区和低阻咸水区的分界线,高密度电法对珊瑚岛地质分层探测效果不佳并不会影响对咸淡水界面的探测识别。

2024年3月

3.2 剖面电阻率反演结果

由于实测剖面存在大量数据畸变点和噪声,初次反演结果均方根误差甚至达到80%。进行初次

反演后,对均方根大于60%的数据点剔除并重新反演,最终反演结果均方根误差都能降到20%以下。并经地形修正处理后,得到各剖面反演电阻率如图3。

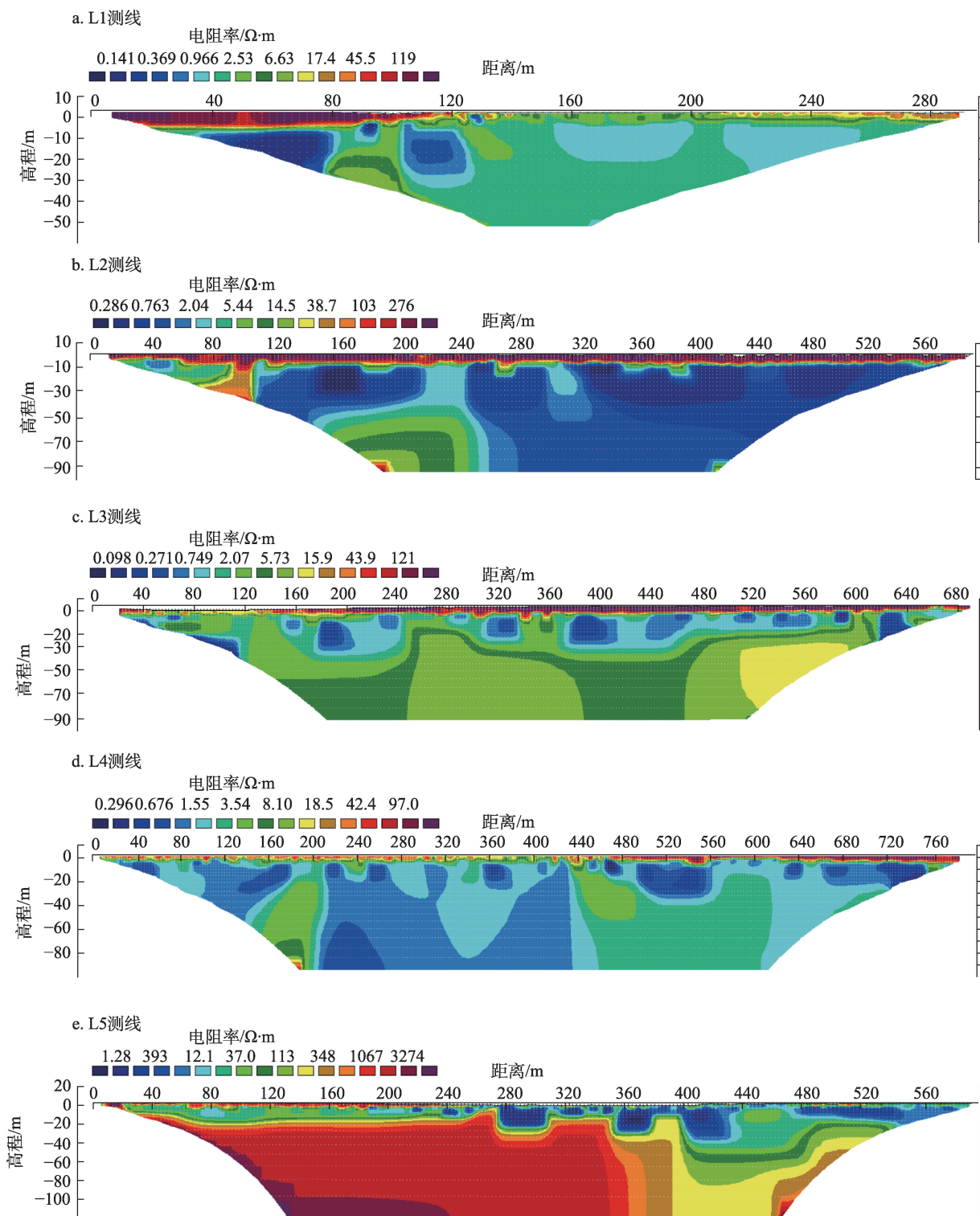


图3 各剖面反演电阻率分布

Figure 3 Inverted resistivity distribution of each profile

从实测电阻率剖面来看,咸淡水界线应分布在珊瑚砂地层内,质量较差的实测电阻率数据点主要在礁灰岩地层内,在识别咸淡水界线过程中仅截取利用深度20 m内的反演电阻率数据。

从电阻率反演结果来看,10 m以深电阻率差异较小,将L3测线反演电阻率剖面与ZK03钻孔地层柱状图叠加(图4),10 m以深珊瑚砂层、珊瑚碎屑地层与礁灰岩的电阻率差别不大,都不超过 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 。但在珊瑚砂地层内具有明显的电阻分层现象,说明咸淡水界线基本位于珊瑚砂地层内,能够有效对咸淡水界线分布进行探测识别。电阻率大于 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ 一般认为是包气带的特征信号,但其分布零散不连续,推断是受茂密植被的根系吸水影响,根系水分干扰了对包气带的识别,测线的布置位置也可能影响对包气带的探测识别。

3.3 剖面咸淡水界线解译

(1) L1测线

L1测线位于东岛生活区东南,起点位于沙堤,

沿北东向岛内延伸300 m。剖面距离100~200 m间穿越人工椰林。淡水透镜体厚度在沙堤处为4.4 m,淡水透镜体从沙堤向岛内逐渐减薄,在剖面距离120 m位置处尖灭。在剖面距离约120~200 m之间,电阻率小于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$,淡水透镜体不发育(图5)。此段岛内地形较沙堤要低0.8 m左右,位于人工椰林内。穿过椰林,进入乔木和灌木林后,浅层电阻率又有所增高,但要明显小于西南侧的沙堤,说明浅层地下水盐分浓度有所降低,但淡水透镜体发育没有沙堤处明显。

(2) L2测线

L2测线位于岛上生活区西侧,大体沿北东向穿越岛屿。此测线识别出的淡水透镜体分布连续,厚度为5~7 m,在5条测线中厚度最大。测线全程基本都位于高度4~5 m的沙堤上,除在距离100 m测线转向处电阻出现异常外,剖面咸淡水界面发育完整,咸淡水界面除在剖面左端靠海处较浅外,标高在-7~-4 m之间(图6),部分地区咸淡水界面可见锯

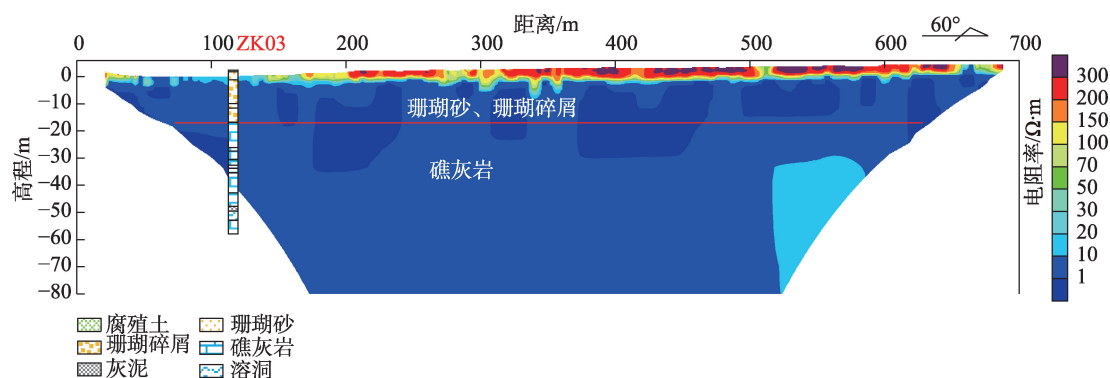


图4 L3剖面反演电阻率与ZK03钻孔岩性

Figure 4 Inverted resistivity of profile L3 and lithology of borehole ZK03

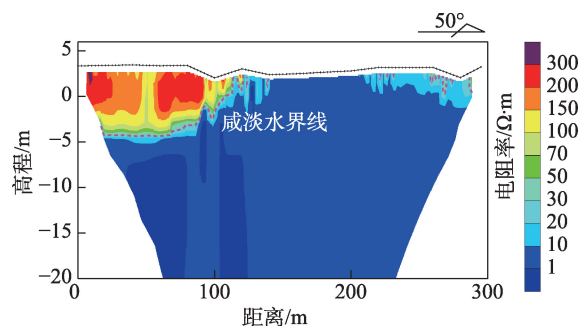


图5 L1剖面反演电阻率分布

Figure 5 Inverted resistivity distribution of profile L1

2024年3月

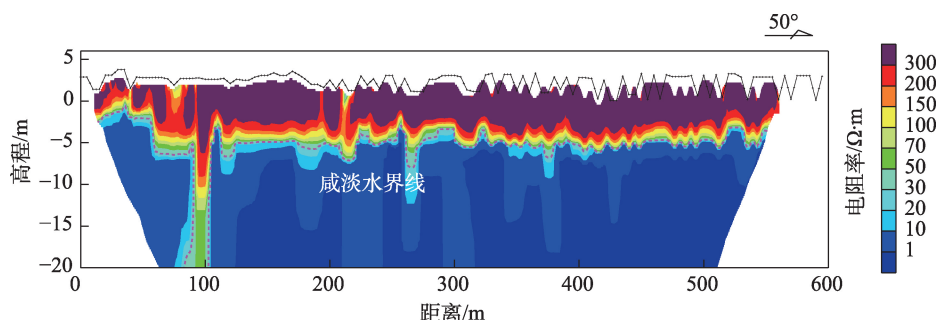


图6 L2剖面反演电阻率分布

Figure 6 Inverted resistivity distribution of profile L2

齿状特征,可能与淡水透镜体的年际和季节动态变化有关。另外,剖面浅层存在大于 $300 \Omega \cdot \text{m}$ 的连续分布的高阻层。西沙群岛雨水 TDS 浓度具有明显的季节差异,根据 Archie 公式计算对应的饱含淡水的珊瑚砂层电阻最高可达 $1900 \Omega \cdot \text{m}$,因此不能排除浅层高阻层中具有接近雨水的淡水电性特征。另外,位于 L2 侧线附近的 ZK01 钻孔测量地下水位埋深 2.8 m,综合来看说明浅层高阻层可能为饱含淡水和包气带珊瑚砂的电性特征,但由于本次调查中仅实施了 3 眼钻孔,尚无法确定淡水透镜体顶面的空间分布。

(3) L3 测线

L3 测线位于东岛东南端,起始点位于牛塘南侧沙堤,沿北东东向穿越岛屿。淡水透镜体在牛塘附近缺失,在测线其余地段厚度为 2~5 m。剖面地形在剖面两侧沙堤处较高,高程 5 m 左右,在牛塘东南侧地形最低,高程 0.4 m 左右。从解译剖面来看,在牛塘附近洼地处,浅部为小于 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 的低阻区(图 7)。牛塘东侧实施的 ZK03 勘探孔初见水位埋深 0.5 m,但未对地下水含盐量等进行取样测量。该处地下水埋藏浅,浅层电阻较低,说明在地形较低的

牛塘,淡水透镜体不发育。据此推断东岛牛塘淡水主要为地表水汇集形成,与地下水联系不密切。穿过牛塘,地表高程大于 1 m 的地区发育有连续的淡水透镜体,透镜体厚度 2 m 左右,咸淡水界面最深处,淡水透镜体厚度可达 5 m。

(4) L4 测线

L4 测线基本沿东岛西部码头段沙堤的内测南东向长轴方向展布,起点位于岛内地势较低处,高程在 3 m 以下,终点位于东岛西部码头东南侧沙堤,高程 5~6 m。该测线沙堤以内地段淡水透镜体破碎不连续,沙堤段淡水透镜体连续分布,最大厚度 3 m。从剖面解译来看,在测线剖面距离约 450 m 以内,地形高程低于 3 m 的测线段,剖面浅层电阻虽较深层明显要高,但 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 等值线分布非常不连续,也没有明显的高阻区(图 8),说明此段剖面淡水透镜体发育较差。距离大于 450 m,地形高程大于 3 m 的测线剖面段,能够识别出连续的咸淡水界面,淡水透镜体厚度最大 3 m。

(5) L5 测线

L5 测线从 L4 测线终点开始,向南东延伸,地形上高程逐渐降低,在牛塘南侧最低为 0.9 m。解译剖

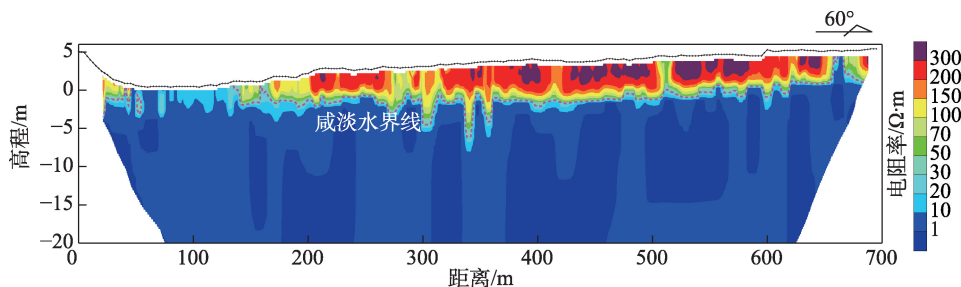


图7 L3剖面反演电阻率分布

Figure 7 Inverted resistivity distribution of profile L3

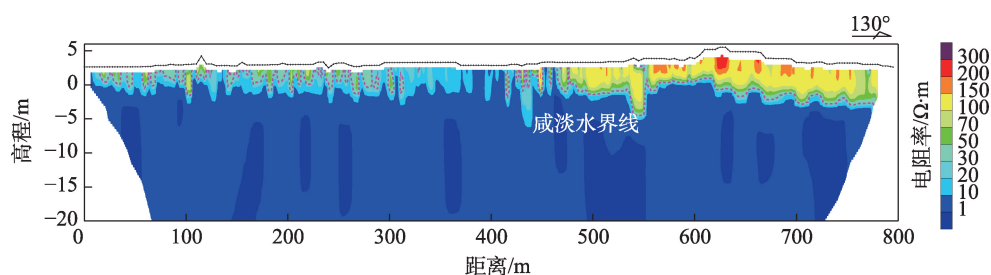


图8 L4剖面反演电阻率分布

Figure 8 Inverted resistivity distribution of profile L4

面北西侧在15 m以深出现大于300 $\Omega \cdot \text{m}$ 的高阻区(图9)。与其余剖面电阻沿垂向变化相反,也和L4剖面东南侧深部电性特征不一致,可能存在测量问题,总体上对咸淡水界线识别不理想。只能大致判断出以牛塘南侧电极为界,北西侧剖面浅层存在明显的高阻区,说明有淡水透镜体发育。而在南东向一侧浅层高阻区发育不连续,淡水透镜体发育破碎化。涨潮和落潮期间分别进行了测量,但由于剖面整体测量效果不理想,未能识别出涨潮和落潮时咸淡水界面位置的差异,剖面电阻率分布总体上两次

测量结果差异不明显(图10),说明本次调查未识别出潮汐对东岛淡水透镜体动态变化的影响。

3.4 东岛咸淡水界面形态

综合各高密度电法侧线剖面识别出的淡水透镜体发育情况和咸淡水界线深度,东岛发育的淡水透镜体在空间分布上有如下特征:在沙堤上较为发育,根据西北部和南部沙堤咸淡水界线深度,沙堤淡水透镜体厚度可达3~7 m,在岛东南地形较高处淡水透镜体也有发育,但厚度较沙堤处较薄,厚度1~4 m。根据西沙群岛已有地质调查和东岛地质钻

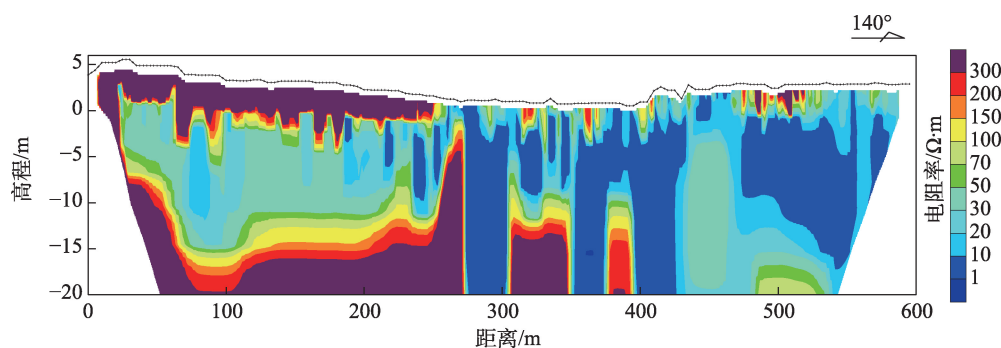


图9 L5剖面反演电阻率分布(涨潮期间)

Figure 9 Inverted resistivity distribution of profile L5 (rising tide period)

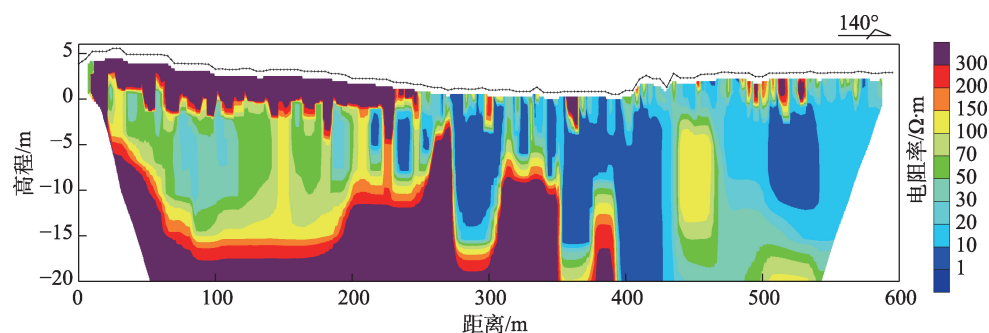


图10 L5剖面反演电阻率分布(落潮期间)

Figure 10 Inverted resistivity distribution of profile L5 (ebb tide period)

2024年3月

探,东岛全新世珊瑚砂与更新世礁灰岩的不整合面埋深为18~19 m,岛内只有北部旧灯塔附近有小面积的海滩岩分布。本次高密度电法实测显示咸淡水界线位于全新世珊瑚砂地层内,未穿过全新世珊瑚砂和更新世礁灰岩的不整合面。

4 讨论

考虑到东岛沉积物组成在水平方向上变化程度不大,影响东岛淡水透镜体空间发育的因素主要为地形和植被。假设地下水补给量空间分布均匀,按照岛屿淡水透镜体形成理论,淡水透镜体在岛屿几何中心附近应该最厚,但由于岛内植被茂密,未能布设穿越岛中心的测线,岛屿中心、北部和东南地区淡水透镜体的厚度尚无可靠实测数据。但根据各测线在岛内洼地部分揭示的咸淡水界线深度来看,在岛内洼地地势较低处,淡水透镜体形态破碎化程度非常严重,局部地区,比如椰树林内、牛塘附近甚至完全无淡水电性特征,推断岛内洼地淡水透镜体厚度较沙堤更薄,局部甚至无淡水。钱学溥著《中国蓄水构造类型》^[37]一书中收录有一张“海南省西沙群岛东岛水文地质剖面图”(p.396),该图系广东省地质局海南地质队基于1968年在东岛进行的水文地质调查所绘制。根据该剖面图中2眼水文地质钻孔中实测淡水透镜体顶底面埋深,东岛淡水透镜体在岛西侧沙堤最厚,厚度5~7 m左右,而在岛屿中间洼地较薄,厚度2~3 m左右。另外,该剖面显示东岛淡水透镜体的咸淡水界面向上凸出,高于海平面。这与本次物探工作识别出的东岛淡水透镜体厚度变化和形态特征是基本一致的。

岛内洼地淡水透镜体发育较差的主要原因可能与白避霜花(麻枫桐)、海岸桐等乔木和灌木的蒸散发耗水有关,冠层截流和根系吸水消耗了大部分降雨,造成难以形成有效的淡水净补给(到达潜水面的补给)。而在地势较高的沙堤,地下水埋深较大,不利于根系吸水,植被发育较岛内洼地更稀疏,因此更易形成淡水透镜体。椰树的蒸发量约为每棵150 L/d,按照成年椰树每棵占地面积25 m²计算^[37],椰树林单位面积淡水蒸发量可达6 mm/d,远大于西沙的实际降水量。在L1测线椰林内,剖面浅层甚至没有淡水电性特征,可见椰树等深根植物吸水作用对淡水透镜体的影响之大。岛内现有的三眼水井

都位于沙堤上,也能佐证沙堤应该是东岛主要地下淡水分布区。

珊瑚礁发育成灰砂岛后,降雨淋滤和地下水淡水积蓄促进了植被发育,但植被从草被发展到灌木丛,再到乔木林后,乔木林的蒸腾耗水又反过来开始遏制淡水透镜体的发育。与高密度电法识别出的东岛淡水透镜体发育形态类似,南太平洋新喀里多尼亚Mba岛^[29]、印度洋Grande Glorieuse岛^[38]的淡水透镜体调查中都发现珊瑚岛淡水透镜体主要发育在地势较高和植被较稀疏的地带,而岛内洼地和植被茂密地带地下水位浅并且咸化程度严重。Comte等^[37]利用数值模拟分析了植被对某珊瑚岛淡水透镜体的影响,珊瑚岛种植椰树林后淡水透镜体储水量显著减小,在海平面上升和气候变化影响下,岛屿洼地和植被度高的地区地下水咸化程度也要高于岛屿整体平均水平。但盐分浓度上升一定水平后阻碍植被发育,通过增加降雨入渗间接起到了缓冲地下淡水咸化的作用。可见,珊瑚岛淡水透镜体受地形和岛上植被影响是天然灰沙岛的普遍规律,淡水透镜体与植被系统的相互关系也是复杂且发生动态变化的,说明珊瑚岛地下水研究需要考虑植被生态系统的演化。

对于植被生长茂盛的天然灰沙岛,岛内淡水透镜体实际形态很大程度上受地下水净补给分布影响,作为唯一天然淡水来源的降雨可能相当一部分被天然植被消耗,不利于淡水透镜体的形成。对于这些岛屿内淡水透镜体的形成,天然植被的蒸散发和根系吸水成为除地层二元结构及其渗透性差异外最重要的影响因素。因此,为了维持岛屿良好的生态系统,天然岛屿生态系统保护应深入植被生态需水和地下水资源之间的平衡关系研究。人工岛生态系统建设在岛屿绿化树种选择上也需要考虑岛屿具体的水资源情况,尽可能保留一定量的地下水淡水储量作为备用供水水源。

5 结论与启示

5.1 结论

本文通过西沙东岛开展的水文地质调查和高密度电法测量工作,基本查明了东岛沙堤附近的淡水透镜体分布特征,划分出了咸淡水分界面。主要结论如下:

(1)利用高密度电法反演电阻率首次识别出了西沙东岛地下水淡水透镜体的发育特征。岛屿西北和南侧的沙堤淡水透镜体较为发育,沙堤地下水透镜体厚度3~7 m,岛内东南地形较高处也有淡水透镜体发育,但厚度较沙堤处要小。在岛内地势较低处,淡水透镜体在形态上破碎化非常严重,识别不出完整连续的咸淡水界线,局部地区甚至完全无地下水淡水。高密度电法是探测识别珊瑚岛地下水淡水透镜体的有效技术手段。

(2)植被蒸散发耗水是造成岛内洼地淡水透镜体较薄的主要因素,珊瑚岛植被蒸散发和根系吸水量的可靠测量与评估是准确评价珊瑚岛地下水淡水资源的重要基础。

(3)珊瑚岛淡水透镜体与岛屿植被具有复杂的相互影响关系。适当减少珊瑚岛深根植物种植面积,减少植被耗水从而增加珊瑚岛地下水淡水透镜体储量,有利于发挥其对珊瑚岛水安全重要保障作用。

5.2 启示

更高精度的淡水透镜体形态刻画和储水量评价需要深入研究淡水透镜体与植被系统发育演化过程中的动态相互关系。由于东岛内部洼地乔灌木茂密,本研究调查布设的物探剖面没有穿越岛中心地区,未能识别出淡水透镜体的最大厚度,岛上现有3眼水井位于岛西南侧沙堤附近,现有的物探资料和地下水观测资料只能反映淡水透镜体局部的形态,尚未能全面揭示东岛淡水透镜体的整体形态,将来调查工作需要对物探调查进一步优化,布设穿越东岛几何中心沿岛屿长轴和短轴方向的物探剖面,并沿剖面建设专门的地下水监测井,以全面揭示东岛淡水透镜体的几何形态,深入研究淡水透镜体和植被生态系统演化的相互关系。

参考文献(References):

- [1] 赵焕庭, 王丽荣. 珊瑚礁岛屿淡水透镜体研究综述[J]. 热带地理, 2015, 35(1): 120–129. [Zhao H T, Wang L R. Review on the study of freshwater lens in the Coral Reef Island[J]. Tropical Geography, 2015, 35(1): 120–129.]
- [2] Werner A D, Sharp H K, Galvis S C, et al. Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551, 819–844.
- [3] White I, Falkland T, Metutera T, et al. Climatic and human influences on groundwater in low atolls[J]. Vadose Zone Journal, 2007, 6(3), 581–590.
- [4] Falkland A, Custodio E. Hydrology and Water Resources of Small Islands: A Practical Guide[M]. Paris: UNESCO, 1991.
- [5] White I, Falkland T. Management of fresh water lenses on small Pacific islands[J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(1): 227–246.
- [6] 韩冬梅, 曹国亮, 宋献方. 南海珊瑚礁人工岛淡水透镜体形成过程及影响因素[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1053–1064. [Han D M, Cao G L, Song X F. Formation processes and influencing factors of freshwater lens in artificial island of coral reef in South China Sea[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1053–1064.]
- [7] Vacher H L, Wallis T N. Comparative hydrogeology of fresh-water lenses of Bermuda and Great Exuma Island, Bahamas[J]. Ground Water, 1992, 30(1): 15–20.
- [8] White I. Fresh Groundwater Lens Recharge, Bonriki, Kiribati[M]. Paris: UNESCO, 1996.
- [9] Gingerich S B, Voss C I, Johnson A G. Seawater–flooding events and impact on freshwater lenses of low-lying islands: Controlling factors, basic management and mitigation[J]. Journal of Hydrology, 2017, 551: 676–688.
- [10] Pulido-Leboeuf P. Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain)[J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(10): 1517–1527.
- [11] Post V E A, Bosscherelle A L, Galvis S C, et al. On the resilience of small-island freshwater lenses: Evidence of the long-term impacts of groundwater abstraction on Bonriki Island, Kiribati[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 133–148.
- [12] Zhang Y P, Li Q H, Luo Y X, et al. Groundwater salinization in a subtropical region, Beihai, southern China: Insights from hydrochemistry and multiple isotopes (H, O, S, Sr)[J]. Applied Geochemistry, 2022, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2022.10532.
- [13] González E, Deus N, Elbracht J, et al. Modelling of the groundwater salinization in the coastal aquifers of Lower Saxony derived by airborne electromagnetics[J]. Grundwasser, 2021, 26: 73–85.
- [14] Tosi L, Baradello L, Teatini P, et al. Combined continuous electrical tomography and very high resolution seismic surveys to assess continental and marine groundwater mixing[J]. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2011, 52: 585–594.
- [15] Cassiani G, Godio A, Stocco S, et al. Monitoring the hydrologic behaviour of a mountain slope via time-lapse electrical resistivity tomography[J]. Near Surface Geophysics, 2009, 7(5): 475–486.
- [16] Wagner F M, Möller M, Schmidt-Hattenberger C, et al. Monitoring freshwater salinization in analog transport models by time-lapse electrical resistivity tomography[J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 140: 1–12.

2024年3月

- ics, 2013, 89: 84–95.
- [17] Eissa M A, Thomas J M, Pohl G, et al. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir Delta, Sinai, Egypt[J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 71: 48–62.
- [18] 苏永军, 范剑, 刘宏伟, 等. 高密度电阻率法探测海水入侵咸淡水界限初步调查研究: 以莱州湾为例[J]. *地质调查与研究*, 2014, 37(3): 177–181. [Su Y J, Fan J, Liu H W, et al. Preliminary survey and study on exploring saltwater freshwater interface of saltwater intrusion by using the high-density resistivity method: A case study on Laizhou Bay[J]. *North China Geology*, 2014, 37(3): 177–181.]
- [19] 徐祖霖. 基于高密度电阻率法的咸淡水界面监测与数值模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021. [Xu Z L. Monitoring and Numerical Simulation Study of The Saline–Freshwater Interface Based on High–Density Resistivity Method[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.]
- [20] Rajab J A, El–Kaliouby H, Tarazi E A, et al. Multiscale geoelectrical characteristics of seawater intrusion along the eastern coast of the Gulf of Aqaba, Jordan[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2023, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104868.
- [21] Asfahani J. Hydraulic parameters estimation by using an approach based on vertical electrical soundings (VES) in the semi–arid Khanasser valley region, Syria[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 117: 196–206.
- [22] 靳开民. 电测深法在宁波平原古河道与咸淡水界面探测中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. [Jin K M. The Application of Electrical Resistivity Method in the Detection of Ancient River Channels and the Saline–Freshwater Interface in the Ningbo Plain [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.]
- [23] Singh S, Gautam P, Kumar P, et al. Delineating the characteristics of saline water intrusion in the coastal aquifers of Tamil Nadu, India by analysing the Dar–Zarrouk parameters[J]. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 2021, DOI: 10.31577/congeo.2021.51.2.3.
- [24] Binley A, Hubbard S S, Huisman J A, et al. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 3837–3866.
- [25] Cellone F, Tosi L, Carol E. Estimating the freshwater–lens reserve in the coastal plain of the middle Río de la Plata Estuary (Argentina)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 357–366.
- [26] Banks E W, Post V E A, Meredith K, et al. Fresh groundwater lens dynamics of a small bedrock island in the tropics, Northern Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125942.
- [27] Ez–zaouy Y, Bouchaou L, Schreiber H, et al. Combined geophysical methods to investigate seawater intrusion in the Souss–Massa coastal area, Morocco[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, DOI: 10.1016/j.gsd.2023.100915.
- [28] 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, DOI: 10.1029/2007GL029981.
- [29] Comte J, Banton O, Join J, et al. Evaluation of effective groundwater recharge of freshwater lens in small islands by the combined modeling of geoelectrical data and water heads[J]. *Water Resources Research*, 2010, DOI: 10.1029/2009WR008058.
- [30] Zarif F, Isawi H, Elshenawy A, et al. Coupled geophysical and geochemical approach to detect the factors affecting the groundwater salinity in coastal aquifer at the area between Ras Sudr and Ras Matarma area, South Sinai, Egypt[J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 2021, DOI: 10.1016/j.gsd.2021.100662.
- [31] 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. [Xu Z, Yang J J, Liu R B, et al. Identification of underground freshwater bodies in coastal areas based on high–density resistivity[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(6): 47–53.]
- [32] 张浪, 刘振文, 姜殿强. 西沙群岛植被生态调查[J]. *中国农业通报*, 2011, 27(14): 181–186. [Zhang L, Liu Z W, Jiang D Q. Ecological investigation of the vegetation in the Paracel Islands[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(14): 181–186.]
- [33] 赵焕庭. 南沙群岛景观的类型和演化[J]. *热带地理*, 1997, 17(1): 1–6. [Zhao H T. Types and evolution of landscapes of the Nansha Islands[J]. *Tropical Geography*, 1997, 17(1): 1–6.]
- [34] Loke M H, Chambers J E, Ogilvy R D. Inversion of 2D spectral induced polarization imaging data[J]. *Geophysical Prospecting*, 2006, 54(3): 287–301.
- [35] 周从直, 方振东, 魏莹, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体的开发利用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2017. [Zhou C Z, Fang Z D, Wei Y, et al. Development and Utilization of Freshwater Lens Bodies in Coral Islands and Reefs[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2017.]
- [36] 崔永圣, 马林, 刘宏岳, 等. 珊瑚岛礁工程地球物理方法初探[J]. *岩土力学*, 2014, 35(S2): 683–689. [Cui Y S, Ma L, Liu H Y, et al. Discussion on geophysical methods applied to investigation of coral island and reef[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S2): 683–689.]
- [37] 钱学溥. 中国蓄水构造类型[M]. 北京: 科学出版社, 1990. [Qian X P. Types of Water Storage Structures in China[M]. Beijing: Science Press, 1990.]
- [38] Comte J C, Join J L, Banton O, et al. Modelling the response of fresh groundwater to climate and vegetation changes in coral islands[J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22: 1905–1920.

Using electrical resistivity tomography method to investigate fresh groundwater lenses on Dong Island, China

HAN Dongmei^{1,2,3}, CAO Guoliang^{4,5}, CAI Dizhu¹, SONG Xianfang^{2,3},
XING Zihao¹, MENG Qingjie¹

(1. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 571127, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Groundwater Conservation of Ministry of Water Resources (in Preparation), Beijing 100083, China; 5. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The subsurface freshwater lens of coral islands is an important resource necessary to maintain the production and living of islanders and ecological conservation. Accurately identifying the morphology of subsurface freshwater lenses on coral islands and revealing the mechanism of subsurface freshwater recharge are important bases for the assessment of groundwater resources on reefs, and are crucial for improving the management of groundwater resources on coral islands. [Methods] Taking Dong Island as the research object, this study combined with hydrogeological survey and high-density resistivity method to identify the distribution of freshwater lenses near sand barriers, and describe the brackish water interface. [Results] The results show that the freshwater lenses on the northwestern and southern parts of the island were relatively developed, and the thickness of the freshwater lenses below the sand dikes was 3-7 m. In the southeast of the island, there were also freshwater lenses developed in the higher terrain, but the thickness was thinner than in the sand barriers, and there was even no fresh groundwater in some local areas. [Conclusion] The development of freshwater lenses in Dong Island is associated with the distribution of topography and vegetation, and the water consumption by evapotranspiration of vegetation is the main factor that causes the thinner freshwater lenses in the low-lying land on the island.

Key words: coral island; fresh groundwater lenses; electrical resistivity tomography; fresh-saline groundwater interface; Dong Island of Xisha Islands