

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.03.12

引用格式: 王卫平,吴成平,张永军,等.航空电磁法在水文地质调查中的应用[J].中国地质调查,2022,9(3):113-121.
(Wang W P, Wu C P, Zhang Y J, et al. Application of airborne electromagnetic method in hydrogeological survey[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(3): 113-121.)

航空电磁法在水文地质调查中的应用

王卫平, 吴成平, 张永军, 梁盛军, 马勋表

(中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 为了对水文地质调查提供多方法、多深度和多参数解释,提高航空电磁法在水文地质调查中的应用效果,以河北曹碑店地区、定陵—北京十三陵水库地区、黑龙江宝清地区、澳大利亚桥维拉地区、山东黄河口地区的航空电磁资料为基础,建立了利用航空电磁法研究海侵程度、水质填图、寻找浅层淡水的定性和定量解释方法。结果表明:航空电磁法可以快速高效地研究不同深度的地下水及海侵程度空间分布特征,快速计算地下水矿化度,尤其可为大范围水文地质调查提供多层次的海侵底界面和水平界线、含水层和隔水层分布及水质分布信息,在多个研究区取得了较好的水文地质勘查效果。

关键词: 航空电磁法; 海侵程度; 浅层淡水; 水质填图; 多深度层次; 矿化度

中图分类号: P319.3+2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2022)03-0113-09

0 引言

航空电磁法在水文地质调查中具有覆盖面积广、速度快、周期短、不受地面障碍物限制等优势。在相同面积下,与1:20万地面水文电磁法相比,航空电磁法投资成本是地面水文电磁法的1/3,生产周期是地面水文电磁法的1/5^[1-2]。与同比例尺的地面电磁法相比,航空电磁法具有更经济、更高效的优越性。以往国内大多数学者利用固定翼 FEM (频率域电磁)系统在西部干旱地区(如甘肃安西—敦煌地区^[3])和东部沿海地区(如广东—深圳地区^[4])进行地下水调查,且解释方法单一,处于试验和试生产阶段。在海侵程度研究和寻找浅层淡水方面,多数利用固定翼 FEM 系统在单一深度平面解释海侵和地下水分布,对其纵向分布和空间分布特征研究不够,且反应深度相对较浅(60 m 以内)^[3-5]。在水质填图方面,多数利用电磁场特征进行定性解释,定量解释较少^[6-7]。本文以河北曹碑店地区^[8]为例,利用直升机 TEM(时间域电磁)

系统研究了多深度的海侵界线和海侵程度;以黑龙江宝清地区^[9]为例,研究了该区含水层分布特征,为多层次水文地质填图、寻找浅层淡水提供重要依据;应用航空电磁响应计算地下水矿化度方法,计算了澳大利亚桥维拉地区^[10]以及山东黄河口地区地下水的矿化度,编制了地下水矿化度分布图。通过本次实例研究,解决了航空电磁法立体、多层次研究海侵程度、水质填图、寻找浅层淡水的问题,获得了一些新的水文地质信息,为其他地区进行水文地质勘查提供技术参考。

1 划分海侵程度

在海陆交界部位,当地下水潜水面低于海水面时,咸水体沿着第四系松散层、断裂破碎带进入淡水体中,这一现象称为海水入侵。

电磁场强度随地下水矿化度或导电离子含量的增加而增强,这是因为水溶液是靠离子导电的,矿化度越高,导电离子含量越高,电磁响应越强。因为固体是靠自由电子导电的,所以一般土壤及岩

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2021-08-13。

基金项目: 中国地质调查局“中国西部主要造山带及盆地航空物探调查(编号: 20201200000210014)”项目资助。

第一作者简介: 王卫平(1963—),男,教授级高级工程师,主要从事航空物探成果解释和方法研究工作。Email: 911733417@qq.com。

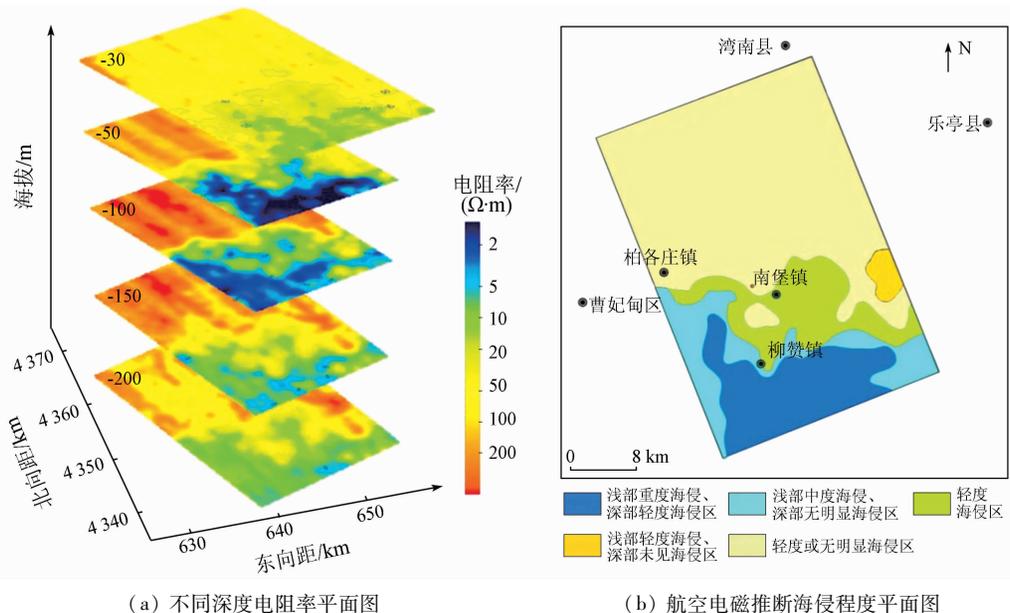
石的导电性比咸水低。自然界土壤含有孔隙,含各种水分,岩石有裂隙,也可能有水的活动,因此,同一类介质因含水量不同而各有差异^[11-12]。

航空电磁场强度与地下含水层的导电性关系密切,即海侵程度越强,地下水含盐度越高,导电性越好。因此,可根据海侵区的航空电磁场强度以及反演的电阻率分布特征,结合地面物探、水文地质资料,对海水入侵程度进行划分。以河北曹妃甸地区为例,分析利用航空电磁法研究海侵程度的水文地质调查效果。曹妃甸地区位于冀东平原南部,包括部分滨海冲积海积平原、冲积风积平原和海积浅海区。水平方向上,从北部全淡水区到南部咸水区以及浅海区,含水砂层为连续分布的整体,不存在隔水边界,具备海水顺层向北部淡水区侵染的条件。在北部漏斗区出现回流,已出现反向补给现象。垂直方向上,含水砂层之间分布弱透水层,缺少稳定的隔水层,具备垂向侵染的条件。

2016年,中国自然资源航空物探遥感中心在河

北曹妃甸地区开展了吊舱式直升机 TEM 测量^[7],详细了解该区海侵界线和海侵程度的空间分布特征,为曹妃甸水资源合理利用提供依据。通过对该区航空 TEM 测量数据进行评价,噪声统计最大为 48 nT/s,满足规范要求。对 TEM 数据进行漂移、噪声校正、叠加及抽道处理,获得了 16 个数据道的电磁响应。在此基础上,利用横向约束反演处理方法^[13-14],获得了每个剖面的电阻率-深度剖面图和不同深度电阻率平面分布图(图 1(a))。结合水文地质资料及电性资料,建立了曹妃甸地区海侵评价划分标准。

- (1) 强海侵区(含卤水区、盐场),表现为强航空电磁响应,视电阻率一般 $< 5 \Omega \cdot m$ 。
- (2) 中等强度海侵区,表现为中等强度的航空电磁响应,视电阻率一般为 $5 \sim 20 \Omega \cdot m$ 。
- (3) 弱海侵区,表现为低缓的电磁场强度,视电阻率一般为 $20 \sim 50 \Omega \cdot m$ 。
- (4) 非海侵区(全淡水区),表现为平静电磁场,视电阻率一般 $> 50 \Omega \cdot m$ 。



(a) 不同深度电阻率平面图 (b) 航空电磁推断海侵程度平面图

图 1 曹妃甸地区不同深度电阻率与海侵程度分布

Fig. 1 Distribution of resistivity and transgression level at different depths in Caofeidian area

根据以上划分标准,综合分析不同深度的电性分布特征,圈出该区不同深度的海侵程度平面分布图,主要包括浅部重度海侵、深部轻度海侵区,浅部中度海侵、深部无明显海侵区,轻度海侵区,浅部轻度海侵、深部未见海侵区,轻度或无明显海侵区 5 种类型(图 1(b))。

研究区海拔 -30 m、-50 m、-100 m、-150 m 和 -200 m 这 5 个深度的电阻率水平切片平面图如图 1(a) 所示,可知电阻率 $< 5 \Omega \cdot m$ 的区域主要分布在该区南部海拔 -50 m 和 -100 m 区域,为浅部海侵区,对应海拔 -150 m 和 -200 m,其电阻率为 $5 \sim 20 \Omega \cdot m$,为中度海侵区,而海拔 -30 m 电阻

率水平切片平面图仅反映近地表的电性特征。近地表土壤大部分位于潜水面之上,土壤含水量低,因此,在研究区南部受海水入侵影响严重的区域,海拔-30 m 区域的电阻率整体高于海拔-50 m 区域的电阻率,受海侵影响相对较小。因此,利用海拔-30 m 水平切片电阻率平面图,可以划分该区近地表土壤的盐碱度。

研究^[15]表明,唐山局部地区咸水底界面的埋藏深度 > 80 m,本次测量结果证明曹妃甸局部地区海水入侵深度 > 150 m,推测曹妃甸地区咸水底板界面深度有进一步下移的趋势。

2 寻找浅层淡水

地下水分布一般具有分带性,浅层地下水的赋存和运移与古沉积环境(沉积相)密切相关。河流相沉积的沉积物以细砂、中细砂为主,多数形成砂体透镜体含水层,水量大、水质较好;河湖相沉积的沉积物以粉砂、细粉砂为主,水量小、水质较差;泛滥平原相沉积的沉积物以黏质土、亚砂土、亚黏土互层为主,不含水或储有次生成因的咸水,形成咸水区。在咸水区,地下水水质与相应的含水层介质电性接近,一般淡水和砂体为高阻,咸水和黏质土的导电性好,为低阻,而过渡类型水和亚砂土的电性介于二者之间。在无咸水分布的地区,除部分黏土和碳质地层外,淡水为相对低阻体,无水区为相对高阻体^[16]。岩溶地区的地电特征与无咸水地区的地电特征类似,由此可知,不同水质和相应含水层与周围介质的电性差异,为航空电磁法进行水资源调查提供了地球物理前提条件。

2.1 定陵—北京十三陵水库地区

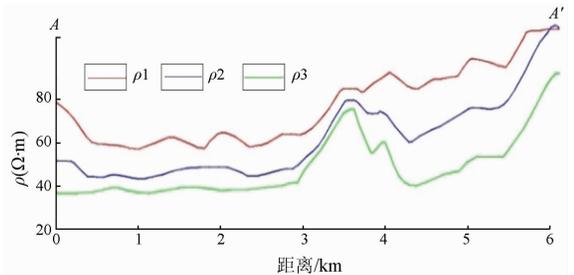
该区为利用吊舱式直升机 FEM 系统在非盐渍化地区验证圈定淡水体的实例。在定陵—北京十三陵水库布置 1 条飞行测线(图 2)。对各种岩性和水库水体进行电阻率测定,发现该区太古宇、各种侵入岩体及岩脉的电阻率平均值均在数千 $\Omega \cdot m$ 以上,具有明显的高阻特征,不会引起明显的电磁异常。而北京十三陵水库水体的电阻率为 31.2 ~ 41.1 $\Omega \cdot m$,相对周围介质,具有明显的低阻特征,可在电磁低频虚分量、中高频实虚分量引起明显的升高电磁响应。



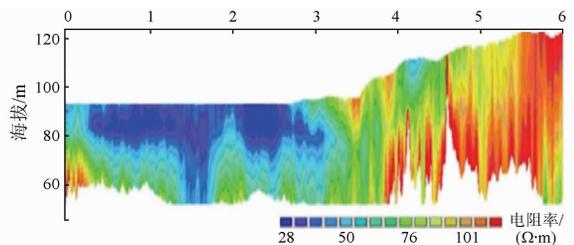
图 2 定陵—北京十三陵水库测线交通位置

Fig. 2 Traffic location map of Ding Tomb - Ming Tombs Reservoir in Beijing survey line

对飞行测线的 FEM 数据进行漂移和噪声校正,并进行约束一维反演,获得了定陵—北京十三陵水库航空电磁转换电阻率深度断面图(图 3)。由图可知,距离为 0.25 ~ 2.75 km 介质电阻率为 35 ~ 45 $\Omega \cdot m$,厚度 20 ~ 30 m,该相对良导体的范围对应水库水体,为水库水体的反映;距离 1.5 km 处的



ρ_1 . 23 250 Hz 视电阻率; ρ_2 . 4 650 Hz 视电阻率; ρ_3 . 930 Hz 视电阻率。
(a) 航空电磁响应转换视电阻率曲线



(b) 航空电磁响应反演电阻率-深度断面图

图 3 定陵—北京十三陵水库航空电磁转换电阻率深度断面图

Fig. 3 Resistivity - depth cross section of Ding Tomb - Ming Tombs Reservoir in Beijing converted from airborne electromagnetic data

淡水厚度增大,为古河床位置水体厚度较大所致。3 000 ~ 6 000 m 绿色区和红色区为高阻基岩的反映。可见,水体在直升机 FEM 系统上反映为相对良导体的特征,与周围地层岩石具有明显的电性差异,证明利用航空电磁法寻找浅层淡水是有效的。

2.2 黑龙江宝清地区

该区为利用直升机 TEM 系统在非盐渍化地区寻找浅层淡水的实例。

2.2.1 水文地质特征

自古近纪以来,宝清盆地沉积了古近系鹤立组、宝泉岭组、富锦组泥岩、砂岩及砂砾岩及第四系砂、砂砾石、砾卵石层,其中第四系孔隙中赋存松散岩类孔隙水,古近系孔隙裂隙中赋存孔隙裂隙水,残山、残丘及山前台地分布的第四系基岩裂隙中也赋存基岩裂隙水,这些含水的地质体(含水层)构成了该区地下水赋存系统。该区主要地下介质含水层呈中低阻电性特征,电阻率 $60 \sim 120 \Omega \cdot m$,砂层呈中等电性,电阻率 $100 \sim 200 \Omega \cdot m$,黏土层呈相对低阻,电阻率 $10 \sim 60 \Omega \cdot m$,火成岩呈相对高阻,电阻率 $180 \sim 1\,000 \Omega \cdot m$ [8]。

2.2.2 含水层分布特征

利用直升机 TEM 数据绘制每条测线的电阻率深度剖面,获得了研究区电性介质空间分布特征。选取海拔 0 m 和海拔 -50 m 做水平切面,以便直观了解电阻率在不同深度的平面分布情况以及岩性和含水体的分布情况。

由海拔 -50 m 水平切片电阻率等值线分布图(图4)可知,该区电阻率主要分布在 $60 \sim 120 \Omega \cdot m$,

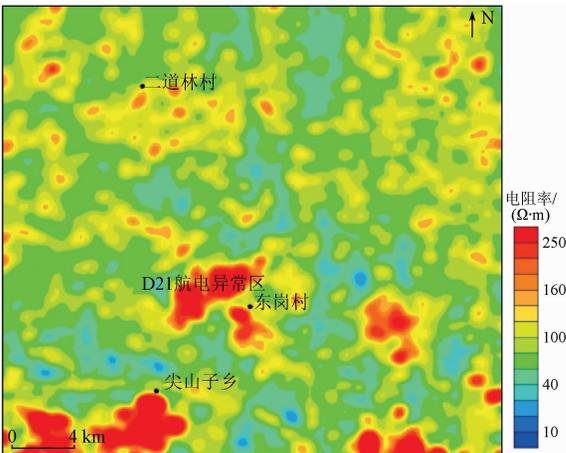


图4 海拔 -50 m 水平切片电阻率等值线

Fig.4 Resistivity contour map at the altitude of -50 m

中北部绿色和浅黄色区域电阻率为 $60 \sim 100 \Omega \cdot m$,主要是含水砂层引起的;中部和南部黄褐色区域电阻率 $> 140 \Omega \cdot m$,其中东岗村、尖山子乡西南部电阻率最高可达 $200 \Omega \cdot m$ 以上,是火成岩高阻体的反映;中南部浅蓝至蓝色区域电阻率为 $10 \sim 40 \Omega \cdot m$,是由黏土层引起的。

对比海拔 0 m 水平切片岩性平面图(图5)可知,海拔 -50 m 航空电磁圈定淡水分布图(图6)显示研究区黏土层范围减少,砂层和泥砂层分布面积增加,砂层含水层主要分布在研究区中北部,泥

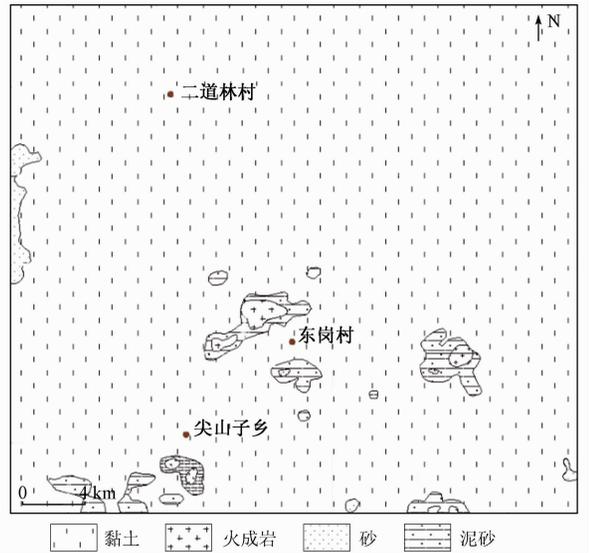


图5 海拔 0 m 水平切片岩性平面

Fig.5 Lithological map at the altitude of 0m

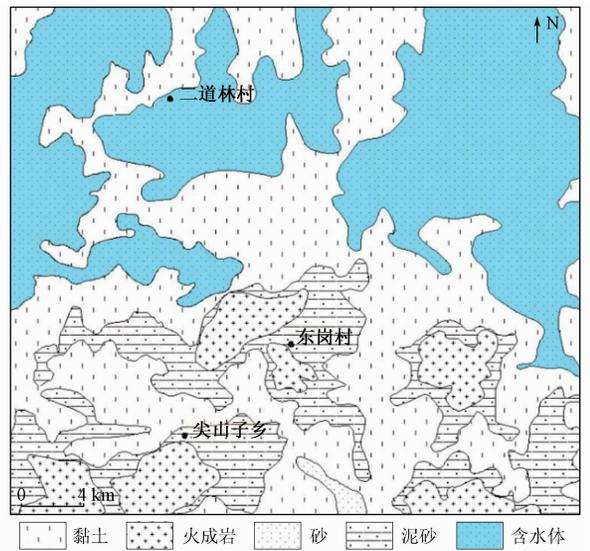


图6 海拔 -50 m 航空电磁圈定淡水分布

Fig.6 Fresh water distribution map delineated by airborne electromagnetic data at the altitude of -50 m

砂层主要分布在研究区南部,一般与火成岩接触。从地层平面分布关系看,黏土层和其他地层均有接触带,砂层、泥砂层一般也与黏土层相接触。区内主要含水层为砂层,泥砂层水量较小,黏土和第四系底部火成岩为隔水层。根据钻孔抽水试验结果,上、下层水力联系弱,说明各隔水层连续性较好。

2.2.3 重点异常含水层三维解释

根据每条测线计算的电阻率三维数据及电性分布特征,参考地面钻探、物探资料,获得了研究区地下岩性三维分布信息, D21 航空电磁异常反应的地层分布特征如图 7 所示。

D21 异常位于研究区中部偏南部(图 4),在 7 条测线上有明显反应,表现为 NE 走向的块状异常,最大长度约 3 500 m。该异常反应的地层信息包括:顶部主要由黏土层引起,底部分布巨厚的火成岩,火成岩顶部形态总体中部凸起,顶部最小埋深约 -150 m。火成岩上覆盖层为泥砂层,泥砂层与顶部黏土层之间为含水砂层(图 6 中蓝色部分)。含水砂层厚度随火成岩顶部埋深而变化,中部受火成岩顶部凸起影响,多处缺失含水层砂层(图 7 中 D 位置),含水层砂层总体表现为“南北厚、中部薄”的分布特征。由于该异常区域的含水层水样矿化度较低,电阻率较高,因此,认为该异常反映的含水层为弱含水异常。

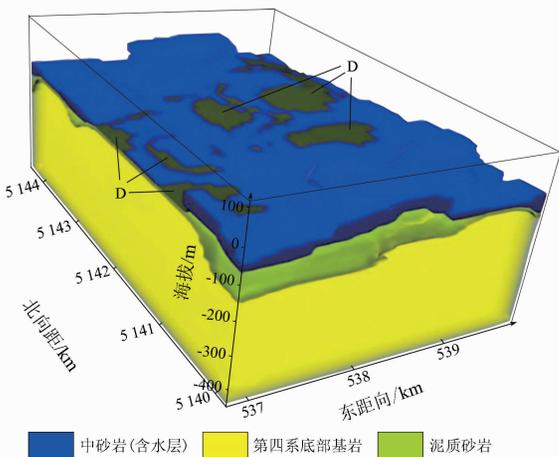


图 7 D21 航电异常区推断地质 3D 模型

Fig. 7 Inferred 3D geological model in D21 airborne electromagnetic anomaly area

3 水质填图

水质填图一般应用于有咸水分布的地区,土

壤、风化层及岩石的电性与盐分含量、土质、湿度、矿物质、孔隙及温度等相关。具有决定作用的是水的盐分,其次是地下介质的性质,而航空电磁法通过探测其电性差异达到划分水质的目的。根据不同频率或时间道的电磁响应特征,以及不同深度水平切片的视电阻率图和矿化度图,结合水文地质资料,可以进行不同深度的水质填图。

3.1 矿化度计算方法

地下介质的电阻率与岩性结构、含水性及地下水矿化程度有关,地下水体的导电性取决于水溶液中的离子数量,而离子数量与水中矿物元素的性质及浓度有关。在有咸水分布的地区,地下含水层的电阻率一般随水的矿化度增大而下降。当 $\rho_s < 20 \Omega \cdot m$ 时,一般为咸水,矿化度 $> 3 \text{ g/L}$; 当 ρ_s 为 $20 \sim 30 \Omega \cdot m$ 时,一般为微咸水—半咸水,矿化度为 $1 \sim 3 \text{ g/L}$; 当 $\rho_s > 30 \Omega \cdot m$ 时,一般为淡水,矿化度一般 $< 1 \text{ g/L}$ 。根据阿尔奇经验公式^[17-18],地下介质电阻率可表示为

$$\rho_s = a \cdot \varphi^{-m} \cdot s^{-n} \cdot \rho_0 \quad (1)$$

式中: ρ_s 为地下介质电阻率, $\Omega \cdot m$; ρ_0 为地下水电阻率, $\Omega \cdot m$; φ 为地层孔隙度(即孔隙体积比),%; s 为含水饱和度(即水充填空隙的比值),%; n 为饱和度指数; m 为孔隙度指数; a 为比例系数。

对于饱水地层, s 为 1,对于地层岩性变化不大的地区, a 、 φ 、 m 可视为常数。

由此可知,地下水矿化度是影响地下介质含水层电阻率的重要因素,即地下水矿化度是影响地下介质电阻率的主要因素,从而为航空电磁法计算地下水矿化度提供了理论依据。

室内实验及实践工作均表明,地下介质电阻率(ρ_s)与地下水矿化度(M)呈幂函数相关^[18],公式为

$$M = A \cdot \rho_s^B \quad (2)$$

式中: M 为地下水矿化度, g/L ; ρ_s 为地下介质电阻率, $\Omega \cdot m$; A 、 B 为待定系数。

在实验室测试不同矿化度水的电阻率值,绘制二者之间的关系曲线。野外可用电测深、测井或其他物探方法获取的数据资料获得采样点地层的电阻率信息,在实验室对相应采样点具有不同

矿化度的水样进行矿化度测定,然后用回归分析等数理统计方法确定电阻率与矿化度之间的数量关系,最终获得航空电磁电阻率计算地下水矿化度的方法。

3.2 应用实例

3.2.1 澳大利亚桥维拉地区

桥维拉泛滥平原是澳大利亚著名的湿地保护生物圈,但近年来降雨量的减少导致地表水和地下水含盐量增加,对湿地植物群的生长产生了负面影响。因此,了解近地表(地表以下 15 m)地下水含盐度的空间分布,对了解泛滥平原的水文地质情况,改进湿地生态管理和保护湿地植物群生长具有重要作用。

在研究区已知钻孔采集水样,对每个水样进行电导率和矿化度测定,获得了每个钻孔对应的视电导率和矿化度数据^[9,19],通过归纳、统计,获得了该区视电导率与含盐度关系图(图 8)。可知,通过回归分析计算,视电导率与矿化度呈线性关系,其关系式为

$$M = 38.9\sigma \quad (3)$$

式中: M 为矿化度, g/L ; σ 为视电导率, ms/m 。

根据公式 3,将研究区视电导率转换为矿化度,并编制了该区矿化度平面图(图 9),该图清晰地反映了该区水质分布特征。研究区中北部(图 9 中 A 区)水质最差,矿化度可达 $80 g/L$ 以上;研究区南部边缘墨累河一带(图 9 中 C 区)水质最好,矿化度

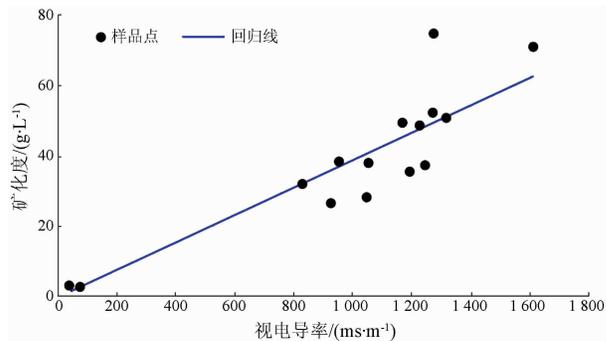


图 8 桥维拉地区视电导率与含盐度关系 (深度为 8.5 ~ 10.8 m)

Fig. 8 Conductivity – salinity relation map in Qiaoweila area (at the depth of 8.5 ~ 10.8 m)

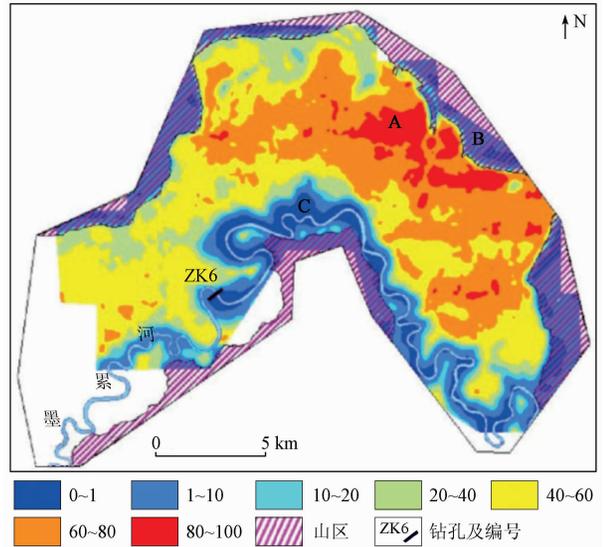


图 9 桥维拉地区航空电磁计算地下水矿化度 ($g \cdot L^{-1}$) 分布 (深度为 8.5 ~ 10.8 m)

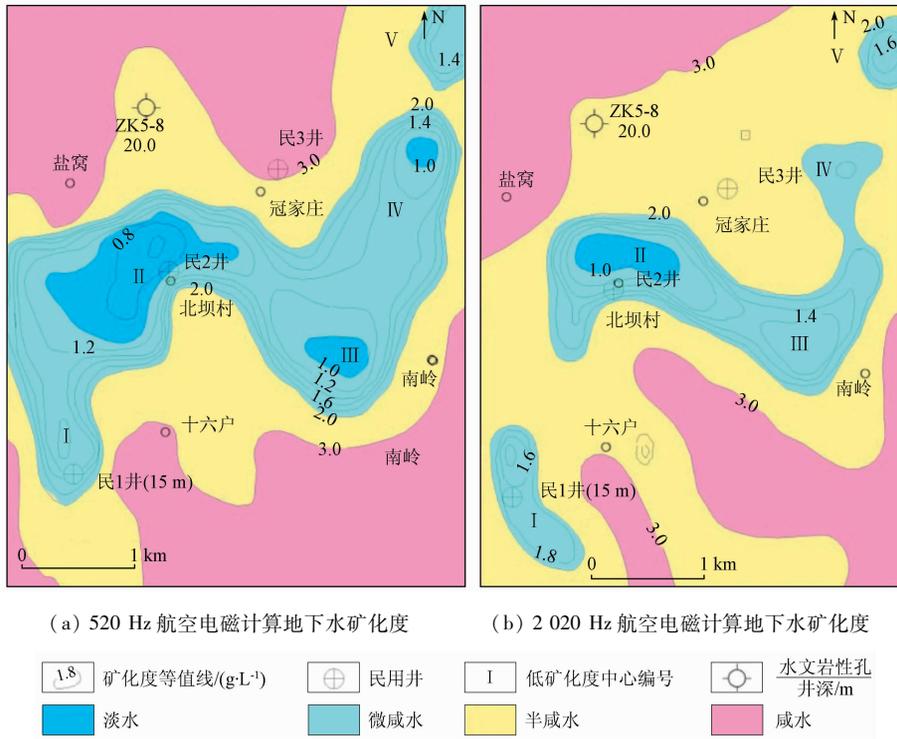
Fig. 9 Mineralization degree ($g \cdot L^{-1}$) map of underground water converted from airborne electromagnetic data in Qiaoweila area (at the depth of 8.5 ~ 10.8 m)

$< 2 g/L$, 为淡水或微咸水; 研究区西部矿化度为 $20 \sim 60 g/L$, 为咸水分布区。

3.2.2 山东黄河口地区

黄河口地区位于华北平原东南部,鲁北平原东部。该区由于多次遭受海侵,海积层和冲海积层广泛分布,地下水水质呈水平分带。根据山东黄河口地区已知水井、钻孔含水层矿化度和电阻率测试数据^[20],建立了该区视电阻率与矿化度的关系式。在此基础上,由该区各频率视电阻率数据或不同深度水平切片电阻率数据,计算不同深度矿化度,并绘制不同深度的矿化度平面等值线图。

山东黄河口盐窝地区航空电磁响应转换地下水矿化度分布图(图 10)清晰地反映了 2 个深度层位的淡水、微咸水、半咸水的变化范围,即浅部淡水体范围较小,深部淡水体范围较大。根据民 2 井水样矿化度分析结果,该区水样矿化度为 $0.8 g/L$, 为淡水,民 1 井水样矿化度为 $1.3 g/L$, 为微咸水,而盐窝镇东北 ZK5 - 8 孔(井深 $20.8 m$)水样矿化度为 $2.5 g/L$, 为半咸水。可知,航空电磁法计算的矿化度与水样测试矿化度基本吻合。



(a) 520 Hz 航空电磁计算地下水矿化度 (b) 2020 Hz 航空电磁计算地下水矿化度



图 10 山东黄河口盐窝地区航空电磁响应转换地下水矿化度分布

Fig. 10 Mineralization degree map of underground water converted from airborne electromagnetic data in Yanwo area of Huanghe River estuary in Shandong Province

4 结论

(1) 航空电磁场特征与海侵程度关系密切, 利用航空电磁场特征及其转换的视电阻率可以划分不同深度的海侵程度和海侵界线。可以利用航空电磁法对重点海侵区域进行不同时间段的大范围重复测量, 解决海侵程度、海侵界线和咸水底界面的变化趋势等重点水文地质问题。

(2) 利用不同频率或不同时间道的航空电磁响应特征及其转换的视电阻率, 可以有效研究不同深度含水层的分布特征及浅层淡水体的空间分布特征, 为干旱缺水地区快速寻找淡水及布置钻探提供依据。

(3) 航空电磁视电阻率与矿化度具有明显的线性相关关系, 利用航空电磁法计算的地下水矿化度与已知采样点测试的矿化度基本一致, 说明利用航空电磁法计算的地下水矿化度是有效的, 解决了大范围、多深度水质填图问题。

(4) 航空 FEM 系统对 0 ~ 100 m 的浅部电性介质分辨率较高, 航空 TEM 系统对 50 ~ 300 m 的地

下电性介质分辨率较高, 如何充分发挥二者在水文地质调查中的优势, 将两种方法有效结合, 建立航空 FEM 和航空 TEM 综合勘查、数据处理和解释方法, 是今后水文地质调查中要重点解决的问题, 以便进一步提高航空电磁法在水文地质调查中的应用效果。

参考文献 (References):

[1] 王卫平, 王守坦, 周锡华, 等. 频率域航空电磁法及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 3-6.
Wang W P, Wang S T, Zhou X H, et al. Frequency Domain Airborne Electromagnetic Method and its Application [M]. Beijing: Geology Publishing House, 2011: 3-6.

[2] 王卫平, 周锡华, 范正国, 等. 吊舱式直升机航空电磁技术示范应用[J]. 中国地质调查, 2015, 2(5): 1-7.
Wang W P, Zhou X H, Fan Z G, et al. Demonstration application of towered bird helicopter-borne electromagnetic technique [J]. Geol Surv China, 2015, 2(5): 1-7.

[3] 满延龙, 孟庆敏, 王祖龙, 等. 甘肃安西—敦煌地区 Y11B 航空物探(电磁)综合站地下水勘查试生产报告[R]. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 1997.
Man Y L, Meng Q M, Wang Z L, et al. The Pre-production Report of Underground Water Exploration in Anxi-Dunhuang Area

- of Gansu Province Using Y11B Airborne Geophysical Integrated Station (Electromagnetic and Magnetic Method) [R]. Langfang: Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, 1997.
- [4] 卢建忠, 吴其反, 方迎尧, 等. 航空物探在珠海—深圳地区浅层水资源环境评价中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(6): 598—604.
- Lu J Z, Wu Q F, Fang Y Y, et al. The application of aerogeophysical exploration to the evaluation of shallow water resource environment of Zhuhai—Shenzhen area [J]. Geophys Geochem Explor, 2007, 31(6): 598—604.
- [5] 罗关俊, 刘彦, 汪俊, 等. 基于航空物探的水工环勘查技术研究[J]. 科技资讯, 2013(31): 244—245.
- Luo G J, Liu Y, Wang J, et al. The hydrological—engineering—environmental survey technique based on aerogeophysics [J]. Sci Technol Informat, 2013(31): 244—245.
- [6] 王卫平, 徐东宸. 航空物探综合测量在我国东部沿海地区水工环勘查中的应用[J]. 物探与化探, 1999, 23(5): 321—325.
- Wang W P, Xu D C. The application of aerogeophysical integrated survey To the hydrological—engineering—environmental Geological exploration in east coastal areas [J]. Geophys Geochem Explor, 1999, 23(5): 321—325.
- [7] 孟庆敏, 满延龙, 王汉威, 等. 吉林省乾安地区 Y12 航空电磁法浅层地下水普查试生产成果报告 [R]. 廊坊: 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 2002.
- Meng Q M, Man Y L, Wang H W, et al. The Achievements Report of Shallow Underground Water Survey Using Airborne Electromagnetic Method in Qianan—Changling of Jilin Province [R]. Langfang: Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, 2002.
- [8] 张永军, 何怡原. 渤海海岸带航空物探遥感调查及应用成果报告 [R]. 北京: 中国自然资源航空物探遥感中心, 2018.
- Zhang Y J, He Y Y. The Report of Aero—geophysical Method and Remote Sensing and Their Application in Bohai Coastal Zone [R]. Beijing: China Natural Resources Aero Geophysical and Remote Sensing Center, 2018.
- [9] 梁盛军, 陈斌, 罗鸥, 等. 黑龙江宝清测区航空物探勘查成果报告 [R]. 北京: 中国自然资源航空物探遥感中心, 2016.
- Liang S J, Chen B, Luo O, et al. The Achievements Report of Aero—geophysical Survey in Baoqing Survey Area of Heilongjiang [R]. Beijing: China Natural Resources Aero Geophysical and Remote Sensing Center, 2016.
- [10] 劳雷, 吉布森, 威尔福德, 等. 应用地球物理和风化层地球科学等综合方法进行含盐度和地下水填图 [C]//SEG 2003 国际博览和年会. 2003: 244—245.
- Lawrie K C, Gibson D, Wilford J, et al. Mapping salinity and groundwater systems: A mulit—disciplinary approach integrating geophysics and regolith geoscience [C]//SEG 2003 International Exposition and Annual Meeting. 2003: 244—245.
- [11] 李雪, 叶思源. 海水入侵调查方法研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 211—217.
- Li X, Ye S Y. Progress in seawater intrusion [J]. Mar Geol Quat Geol, 2016, 36(6): 211—217.
- [12] 刘宏伟, 黄忠锋, 郭旭, 等. 地球物理技术在识别海(咸)水入侵界线中的应用——以莱州湾冲洪积扇区为例 [J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(9): 58—63.
- Liu H W, Huang Z F, Guo X, et al. Application of geophysical methods to detecting sea water or saline water intrusion: A case study of alluvial—Proluvial fan of Laizhou Bay [J]. Mar Geol Front, 2016, 32(9): 58—63.
- [13] 殷长春. 航空电磁理论与勘查技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1—14.
- Yin C C. Airborne Electromagnetic Theory and Exploration Technology [M]. Beijing: Science Press, 2017: 1—14.
- [14] 殷长春, 张博, 刘云鹤, 等. 航空电磁勘查技术发展现状及展望 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2637—2653.
- Yin C C, Zhang B, Liu Y H, et al. Review on airborne EM technology and developments [J]. Chin J Geo Phys, 2015, 58(8): 2637—2653.
- [15] 王丹, 李昌存, 艾立志. 唐山沿海地区海水入侵及防治措施 [J]. 资源与产业, 2006, 8(3): 81—83.
- Wang D, Li C C, Ai L Z. The seawater intrusion and the prevention measures in Tangshan coastal area [J]. Resour Indust, 2006, 8(3): 81—83.
- [16] 孟庆敏, 满延龙. 频率域航空电磁法的应用领域及应用机制 [J]. 物探与化探, 2013, 37(2): 260—263.
- Meng Q M, Man Y L. The application fields and application mechanism of the frequency field airborne electromagnetic method [J]. Geophys Geochem Explor, 2013, 37(2): 260—263.
- [17] 利德, 彼得斯. 航空电磁在西澳大利亚甘蔗河用于供水规划调查 [C]//SEG 2015 国际博览和 86 届年会. 2015: 151—172.
- James R, Peters G. Airborne electromagnetic survey for water supply planning—Cane River, Western Australia [C]//SEG 2015 International Exposition and 86th Annual Meeting. 2015: 151—172.
- [18] Palamara D R, Rodriguez V B, Kellett J, et al. Salt mapping in the Lower Macquarie area, Australia, using airborne electromagnetic data [J]. Environ Earth Sci, 2010, 61(3): 613—623.
- [19] 安尼森, 威瑟利. 航空电磁法在地下水勘探中的应用 [C]//SEG 2015 国际博览和 86 届年会. 2015: 216—219.
- Annisson C, Wetherley S. Groundwater exploration using airborne electromagnetic data [C]//SEG 2015 International Exposition and 86th Annual Meeting. 2015: 216—219.
- [20] 王卫平, 徐东宸, 王启辉, 等. 山东黄河口地区航空物探(磁、电、放)勘查成果报告 [R]. 北京: 中国国土资源航空物探遥感中心, 2006.
- Wang W P, Xu D C, Wang Q H, et al. The Achievements Report of Aero—geophysical Survey in Huanghekou Area of Shandong [R]. Beijing: China Natural Resources Aero Geophysical and Remote Sensing Center, 2006.

Application of airborne electromagnetic method in hydrogeological survey

WANG Weiping, WU Chengping, ZHANG Yongjun, LIANG Shengjun, MA Xunbiao
(China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to provide interpretations with various methods, multi – depth levels and multiple parameters and improve the application effect of airborne electromagnetic method in hydrogeological survey, the authors in this paper established the qualitative or quantitative methods, including studying the transgression level through airborne electromagnetic, water quality mapping and superficial fresh – water exploration, based on the data of Caobeidian area in Hebei, Ding Tomb – Ming Tombs Reservoir in Beijing, Baoqing area in Heilongjiang, Qiaoweila area in Australia and Huanghe River estuary area in Shandong Province. It is proved that airborne electromagnetic method can be used to study the underground water at different depths, the spatial distribution characteristic of transgression and its levels, and can also be used to calculate the degree of underground water mineralization quickly. Especially, the airborne electromagnetic method can provide multi – depth surfaces of transgression and their horizontal boundaries, the distributions of aquifer and aquifuge, and the distributions of water with different qualities, which has shown obvious hydrogeological exploration effect in several study areas.

Keywords: airborne electromagnetic method; transgression level; superficial fresh – water; water quality mapping; multi – depth level; mineralization degree

(责任编辑: 常艳)