

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2020.0221

王卫平,吴成平,于长春,等.频率域航空电磁法水资源探测深度及应用研究[J].地质科技通报,2020,39(2):191-197.

Wang Weiping, Wu Chengping, Yu Changchun, et al. Detecting depth of frequency domain airborne electromagnetic method for water resource investigation and its applications[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 191-197.

频率域航空电磁法水资源探测深度及应用研究

王卫平, 吴成平, 于长春, 马勋表, 谢汝宽

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要:为了了解频率域航空电磁法在水资源勘查中的应用条件和勘查效果,以层状介质模型为基础,计算了多种水文地电模型、多种电磁系统装置的频率域航空电磁响应。通过分析吊舱式直升机频率域航空电磁系统、固定翼频率域航空电磁系统在不同水文地电模型的电磁响应特征和衰减规律,分析了这2套系统在不同水文地电模型条件下的探测深度,即在盐渍化地区,频率域航空电磁系统最大勘探深度为60 m,在非盐渍化地区最大勘探深度为130 m。在综合分析频率域航空电磁法在水资源勘查应用前景的基础上,通过国内外应用实例表明,频率域航空电磁法在中国东部沿海地区,以及内陆干旱地区寻找浅层淡水是有效的。该项成果对今后利用频率域航空电磁法进行水资源调查具有重要意义。

关键词:频率域航空电磁法;水资源调查;探测深度;应用效果

中图分类号:P631.2⁺22;P631.3⁺26

文章编号:1000-7849(2020)02-0191-07

收稿日期:2019-05-14

Detecting depth of frequency domain airborne electromagnetic method for water resource investigation and its applications

Wang Weiping, Wu Chengping, Yu Changchun, Ma Xunbiao, Xie Rukuan

(China Aero Geophysical Survey & Remote-Sensing Center for Land Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to know the application condition and its exploration effects of frequency domain airborne electromagnetic method used in water resource investigation, this paper calculates various hydrologic geoelectric models and the responses of different frequency airborne electromagnetic system based on the layer model. Through analysing the electromagnetic response feature and attenuation law of towered helicopter frequency electromagnetic system and fixed wing frequency electromagnetic system used in different hydrologic geoelectric models, the paper analyses the different detecting depths of the two systems using different hydrologic geoelectric models. The maximal depth of frequency airborne electromagnetic system in saline areas is 60 meters, and the maximal depth in non-saline areas is 130 meters. Based on comprehensive analysis of the application prospect of the frequency airborne electromagnetic method applied to water resource investigation and the application samples at home and abroad, the paper demonstrates the effect of frequency airborne electromagnetic method used in fresh water resource investigation in East China coastal area and the arid inland area. The result is significant for using frequency airborne electromagnetic method in water resource investigation.

Key words: frequency airborne electromagnetic method; water resource investigation; detecting depth; application effect

基金项目:国家重点研发计划项目“综合航空物探地球物理探测系统集成方法技术研究”(2017YFC0602201)

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。E-mail:911733417@qq.com

通信作者:于长春(1964—),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。E-mail:1030811473@qq.com

频率域航空电磁法是利用地下物质的导电性、导磁性(有时也包括介电性或电化性)的差异在飞行器中测量不同频率变化下电磁场的空间分布和频率特性,进而推断地下不同物质的分布,从而解决各类地质问题的方法。频率域航空电磁系统可分为固定翼频率域航空电磁系统(以下简称“固定翼系统”)和吊舱式直升机频率域航空电磁系统(以下简称“吊舱系统”),固定翼系统由于工作效率较高、成本相对较低,且通常适用于平缓或缓丘地区的大面积水文地质调查等任务。吊舱系统具有机动灵活、探测分辨率高等优势,但与固定翼系统相比,成本相对较高,工作效率稍低,主要应用在重点水资源地区的中大比例尺勘查工作。

笔者将以层状介质分布的浅层典型地下水分布为例,其中包括非盐渍化地区和盐渍化地区^[1],建立典型水文层状介质地电模型,计算水平共面、垂直共面、垂直同轴 3 种装置在不同水文地电模型条件下的频率域航空电磁响应特征,并结合该类电磁系统主要技术指标,分析 2 种系统在不同水文地电条件下的最大探测深度。在综合分析的基础上,通过频率域航空电磁法在国内外水文地质勘查中的应用实例及应用效果,探讨频率域航空电磁法在中国水文地质勘查中的应用前景^[2-3]。

1 频率域航空电磁法探测浅水资源基本原理

频率域航空电磁法是以水平、垂直放置的线圈作为发射装置,向空间发射交变磁场,并激发地下良导介质产生感应电流,并由接收线圈接收这种涡旋电流在空间产生的交变二次磁场。航空电磁法正是通过分析接收到的二次磁场变化规律来间接了解地下水及周围介质电阻率的分布特征。在实际生产过程中,测得的二次场要用一次场归一化,用一次场的百万分之一($\times 10^{-6}$)表示^[1]。由于发射线圈直径要远小于线圈距激发水文地质体的距离,由发射线圈所建立的磁场可以等同于磁偶极子发射场,发射磁矩垂直于线圈平面。由于在某种条件下地下水多呈水平层状分布,笔者以水平层状大地模型来分析频率域航空电磁法探测地下水的分辨能力和穿透能力。

1.1 层状大地模型算法

对于水平层状介质上空,高度为 h 处的垂直或水平发射磁偶极子(图 1),当接收线圈(R_x)(垂直或水平)与发射线圈(T_x)处于同一水平面上,并且二者中心距为 r ,发射线圈工作圆频率为 ω 时,通过求解波动方程,可以得到不同装置类型接收线圈处二次磁场强度 H_2 与一次磁场强度 H_1 比值的计算公式如下^[4]:

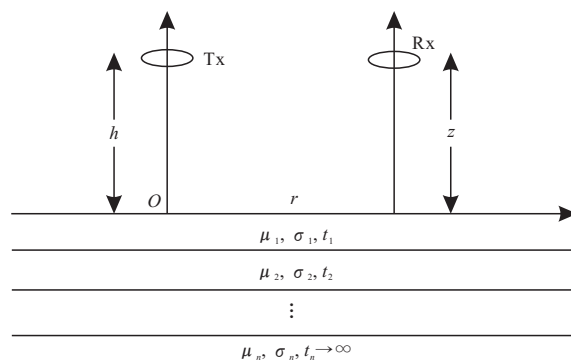


图 1 频率域航空电磁法层状介质模型图

Fig.1 The layer model for frequency airborne electromagnetic method

对于水平共面装置

$$\frac{H_2}{H_1} = r^3 \int_0^\infty R_{TE} e^{-2h\lambda} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda \quad (1)$$

对于垂直共面装置

$$\frac{H_2}{H_1} = r^2 \int_0^\infty R_{TE} e^{-2h\lambda} \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda \quad (2)$$

对于垂直同轴装置

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{r^3}{2} \int_0^\infty R_{TE} e^{-2h\lambda} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda - \frac{r^2}{2} \int_0^\infty R_{TE} e^{-2h\lambda} \lambda^2 J_1(\lambda r) d\lambda \quad (3)$$

$$R_{TE} = \frac{Y_l - Y_0}{Y_l + Y_0} \quad (4)$$

式中: R_{TE} 表示激化模式下的反射系数; $Y_0 = u_0 / i\omega\mu_0$,为自由空间的特征导纳, μ_0 为自由空间的磁导率,即 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $u_0 = (\lambda^2 + k_0^2)^{1/2}$, $k_0 = (-i\sigma_0\mu_0\omega)^{1/2} = 0$, σ_0 为自由空间的电导率; Y_l 为地表导纳,对于水平层状大地模型可以由以下递推公式求得:

$$Y_l = \hat{Y}_l \frac{Y_{l+1} - \hat{Y}_l \tanh(u_l t_l)}{Y_l + \hat{Y}_{l+1} \tanh(u_l t_l)}, l = 1, 2, \dots, n-1 \quad (5)$$

$$\hat{Y}_l = \frac{u_l}{i\omega\mu_l} \quad (6)$$

$$u_l = (\lambda^2 + k_l^2)^{1/2} \quad (7)$$

$$k_l = (-i\omega\sigma_l\mu_l - i\omega^2\epsilon_0\mu_l)^{1/2} \quad (8)$$

$$Y_n = \hat{Y}_n \quad (9)$$

式中: t_l 为第 l 层厚度; μ_l 为第 l 层相对磁导率; σ_l 为第 l 层电导率; ϵ_0 为自由空间的介电常数。

当忽略地下介质磁性参数的影响,即认定地下介质的磁导率为自由空间的磁导率 μ_0 后,式(4)~(9)可以简化为如下形式:

$$R_{TE} = \frac{\lambda - \hat{u}_l}{\lambda + \hat{u}_l} \quad (10)$$

$$1 + \frac{\hat{u}_{l+1} - u_l}{\hat{u}_{l+1} + u_l} e^{-2u_l h}$$
$$u_l = u_l + \frac{\hat{u}_{l+1} - u_l}{1 - \frac{\hat{u}_{l+1} - u_l}{\hat{u}_{l+1} + u_l} e^{-2u_l h}}, \quad l = 1, 2, \dots, n - 1$$

(11)

$$u_l = (\lambda^2 - k_l^2)^{1/2}$$

(12)

$$k_l = (-i \sigma_l \mu_0 \omega)^{1/2}$$

(13)

$$u_n = (\lambda^2 - k_n^2)^{1/2}, \quad k_n = (-i \sigma_n \mu_0 \omega)^{1/2}$$

(14)

由式(1)~(3)可以看出,水平层状介质上方偶极子场的计算公式中均含有对零阶($J_0(\lambda r)$)或一阶($J_1(\lambda r)$)贝塞尔函数的广义积分。为了提高计算效

率,保证计算精度,本次研究采用快速汉克尔变换数字滤波法进行计算。

1.2 典型水文地质模型

选择盐渍化地区和非盐渍化地区 2 种水文地质环境^[5]和 3 层水文地电模型进行计算,地电模型参数见表 1。

盐渍化地区水文地电模型第一层为咸水,第二层为淡水,第三层为咸水,根据频率域航空电磁法的特点,第一层的厚度在 30~150 m 之间变化,以研究频率域航空电磁法对咸水层的穿透能力。该类水文地质模型主要适合于西部干旱地区(有咸水)和东部沿海地区(海侵)。

表 1 典型水文地电模型一览表
Table 1 Classical hydrologic geoelectric models

地电模型参数	盐渍化地区水文地电模型	非盐渍化地区水文地电模型
第一层电阻率/(Ω·m)	10(咸水层)	100(不含水层)
第二层电阻率/(Ω·m)	50(淡水层)	30(淡水层)
第三层电阻率/(Ω·m)	10(咸水层)	100(不含水层)
第一层厚度/m	30,50,70,90,110,150	30,50,70,90,110,150,200
第二层厚度/m	100	300

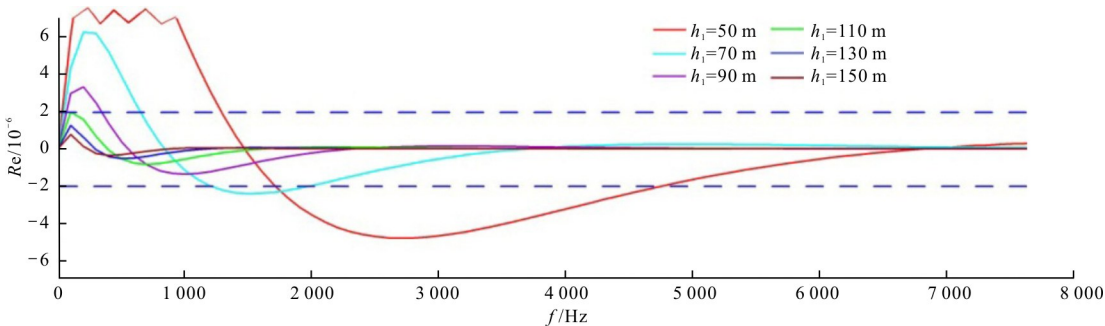
非盐渍化地区水文地电模型第一层为相对高阻层(不含水层),第二层为淡水层,第三层为相对高阻层(不含水层),第一层的厚度在 30~200 m 之间变化,主要是为了研究频率域航空电磁法对淡水的分辨能力和穿透能力。该类水文地质模型主要适合于内陆无咸水地区。

2 频率域航空电磁法水资源探测深度分析

2.1 吊舱系统探测深度分析

根据表 1 中盐渍化地区水文地电模型参数,按

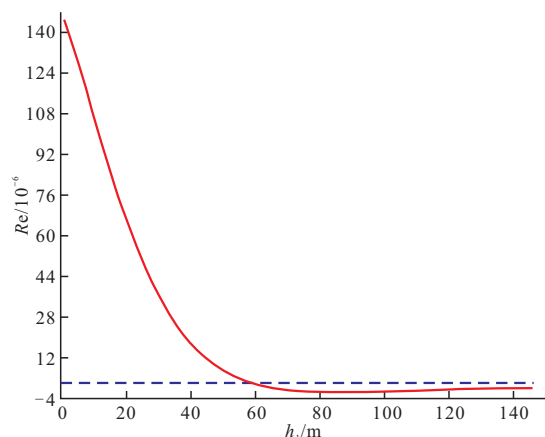
照式(1)计算了第一层不同厚度条件下的电磁响应。为了进行探测深度分析,将层状模型计算的电磁响应值减去均匀半空间模型的电磁响应值,绘成随频率变化的电磁响应曲线图(图 2),设电磁系统噪声水平为 2×10^{-6} 。由图 2 可以看出,当工作频率大于 5 000 Hz,且第一层电阻率为 10 Ω·m,厚度大于 50 m 时,第二层电阻率为 50 Ω·m 淡水体的电磁响应小于系统的噪声水平,即探测不到第二层电阻率为 50 Ω·m 淡水体的电磁响应;当工作频率小于 5 000 Hz,只有当第一层厚度小于 90 m 时,才在低频位置,第二层电阻率为 50 Ω·m 淡水体的电磁



图中为水平共面收发装置,收发线圈离地高度为 30 m,收发距为 6.5 m,纵坐标表示电磁实分量,单位为 10^{-6} ;图中每一种颜色的曲线表示第一层的厚度不变,第二层的电磁响应随工作频率变化的关系图;蓝色虚线为噪声水平

图 2 吊舱系统在盐渍化地区不同埋藏深度电磁响应特征曲线(第一层电阻率为 10 Ω·m)

Fig.2 The characteristic curves of electromagnetic response at different depths in the saline areas



系统收发装置为水平共面,收发线圈离地高度为 30 m,收发距为 6.5 m,纵坐标表示电磁实分量,单位为 10^{-6} ;图为第二层的电磁响应随埋藏深度变化的关系图;蓝色虚线为噪声水平

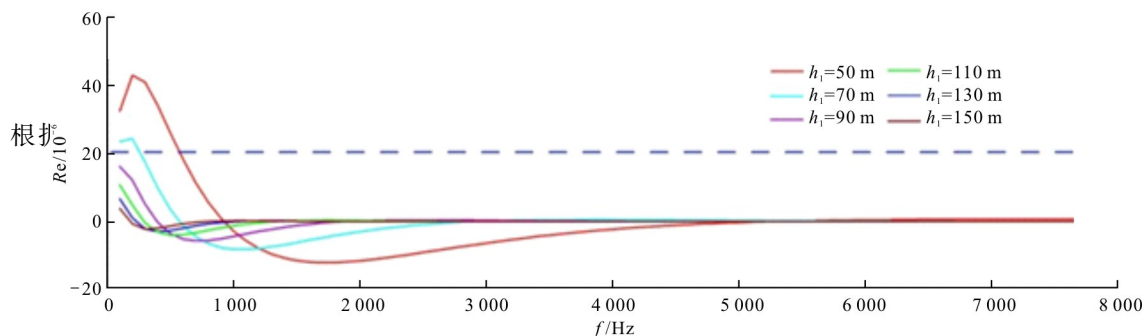
图 3 盐渍化地区电磁响应特征与探测深度分析(第一层电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$)

Fig.3 The analysis of electromagnetic feature and detecting depth in the saline areas

响应大于 2×10^{-6} ,即可以探测到第二层淡水体。比如对于 IMPULSE 吊舱系统,以水平共面装置为例,当低频为 930 Hz,只有第一层厚度为 50 m 时,才能有效探测到第二层电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 淡水体的电磁响应。从图 3 可较清晰地看出,当第一层厚度小于 60 m,第二层电阻率为 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 淡水体的电磁响应大于 2×10^{-6} ,表明当第一层厚度小于 60 m,该系统可以探测到第二层的淡水体,即在 $10 \Omega \cdot \text{m}$ 咸水覆盖层的水文地质条件下,IMPULSE 系统的最大勘探深度为 60 m。

图 4 为由非盐渍化地区水文地电模型计算的第二层淡水体电磁响应随埋藏深度变化的关系图,可以较清晰地看出,当第一层电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,厚度小于 130 m 时,第二层电阻率为 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 淡水体的电磁响应大于 2×10^{-6} ,即当第一层厚度小于 130 m,该系统可以探测到第二层的淡水体。因此在 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 覆盖层的水文地质条件下,IMPULSE 系统的最大勘探深度为 130 m。

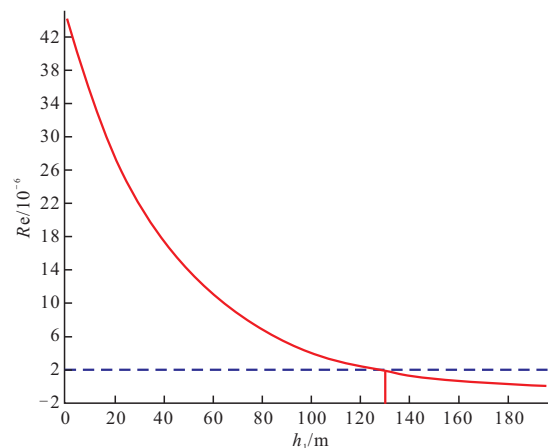
2.2 固定翼系统探测深度分析



系统收发装置为垂直共面,收发线圈离地高度为 100 m,收发距为 21 m,纵坐标表示电磁实分量,单位为 10^{-6} ;图为第一层的厚度不变,第二层的电磁响应随工作频率变化的关系图;蓝色虚线为噪声水平

图 5 固定翼系统在盐渍化地区不同埋藏深度电磁响应特征曲线(第一层电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$)

Fig.5 The characteristic curves of electromagnetic response at different depths in the saline areas



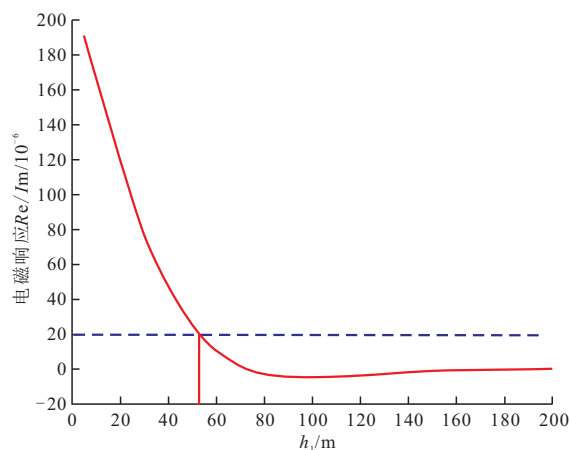
系统收发装置为水平共面,收发线圈离地高度 30 m,收发距 = 6.5 m,纵坐标表示电磁实分量,单位为 10^{-6} ;图为第二层的电磁响应随埋藏深度变化的关系图;蓝色虚线为噪声水平

图 4 非盐渍化地区电磁响应特征与探测深度分析(第一层电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$)

Fig.4 The analysis of electromagnetic feature and detecting depth in the non-saline areas

进行了分析,固定翼系统由于受飞行速度、地形、地物的限制,飞行高度与直升机系统相比相对较高,通常固定翼飞机离地高度为 100 m,设系统噪声水平为 20×10^{-6} 。

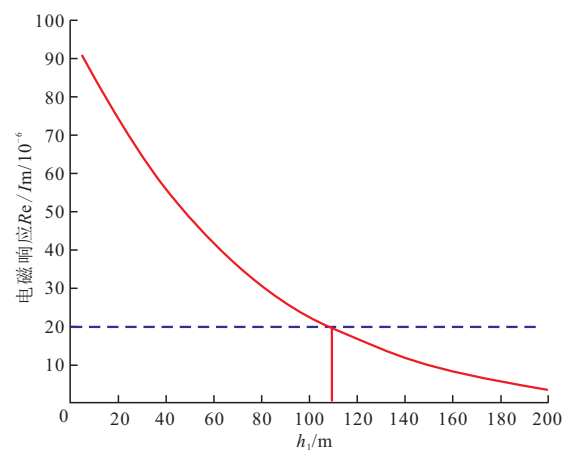
由图 5 可以看出,当工作频率大于 5 000 Hz,且第一层电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,厚度大于 50 m 时,第二层电阻率为 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 淡水体的电磁响应基本为零。当工作频率大于 700 Hz 时,电磁响应也小于系统的噪声水平 20×10^{-6} ,即探测不到第二层电阻率为 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 淡水体的电磁响应;在工作频率小于 700 Hz 条件下,只有当第一层厚度小于 70 m 时,第二层电阻率为 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 淡水体的电磁响应大于系统噪声水平 20×10^{-6} 。比如对于 Tridem 固定翼电磁系统,在低频为 520 Hz 条件下,只有当第一层厚度为 50 m 时,才能探测到第二层电阻率为 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 淡



系统收发装置为垂直共面装置,收发线圈离地高度为 100 m,收发距为 21 m, Re/I 为电磁实分量与虚分量比值;图为第二层的电磁响应随埋藏深度变化的关系图;蓝色水平虚线为噪声水平

图6 盐渍化地区电磁响应特征与探测深度分析(第一层电阻率为 $10 \Omega \cdot m$)

Fig.6 The analysis of electromagnetic feature and detecting depth in the saline areas



系统收发装置为垂直共面装置,收发线圈离地高度为 100 m,收发距为 21 m,图为第二层的电磁响应随埋藏深度变化的关系图;蓝色水平虚线为噪声水平

图7 非盐渍化地区电磁响应特征与探测深度分析(第一层电阻率为 $100 \Omega \cdot m$)

Fig.7 The analysis of electromagnetic feature and detecting depth in the saline areas

水体的电磁响应。从图 6 可以较清晰地看出,当第一层厚度小于 52 m 时,第二层电阻率为 $30 \Omega \cdot m$ 淡水体的电磁响应大于系统噪声水平 20×10^{-6} ,即当第一层厚度小于 52 m 时,Tridem 系统才可以探测到第二层的淡水体。

图 7 为固定翼系统在非盐渍化地区水文地电模型计算的第二层淡水体电磁响应随埋藏深度变化的关系图,可以较清晰地看出,当第一层电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 、厚度小于 108 m 时,第二层电阻率为 $30 \Omega \cdot m$ 淡水体的电磁响应大于 20×10^{-6} ,即当第一层厚度小于 108 m 时,该系统可以探测到第二层的淡水体。

由此可见,固定翼系统由于飞行高度和系统噪声水平较大,其对地下淡水的勘探深度较吊舱系统略小一些。

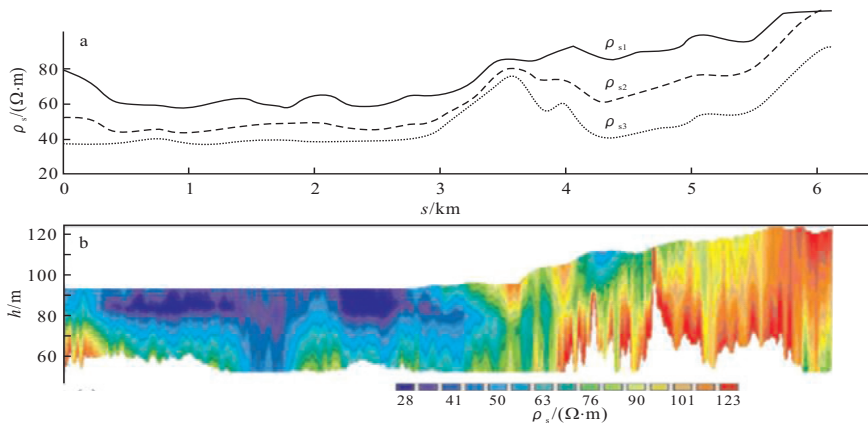
3 应用效果

3.1 应用实例

3.1.1 北京十三陵水库实例

为了验证吊舱系统在探测地下淡水方面的有效性,在定陵一十三陵水库布置了一条飞行试验测线。经对各种岩性和水库水体进行电阻率测定,测得该区太古宇以及各种侵入岩体和岩脉的电阻率平均值均在数千欧姆米以上,为明显的高阻特征,不会引起明显的电磁异常,而密云水库水体电阻率为 $31.2 \sim 41.1 \Omega \cdot m$,相对周围介质为明显的低阻特征,可在电磁低频虚分量以及中高频实虚分量引起明显的升高电磁响应。

图 8 中电阻率—深度断面(CDI)水平距离 250~



a 中 ρ_s 表示共面装置 3 个频率实虚分量转换的视电阻率曲线,其中红色曲线表示高频 23 250 Hz,蓝色曲线表示中频 4 650 Hz,绿色曲线表示低频 930 Hz; s 表示水平距离; h 表示海拔;b 为 3 个频率转化的电阻率—深度断面,蓝色区域表示水库水体

图8 定陵一十三陵水库航空电磁转换电阻率深度断面图

Fig.8 The resistivity-depth profile from airborne electromagnetic data in Dingling-Shisanling reservoir area

2 750 m 之间的电阻率 $35 \sim 45 \Omega \cdot \text{m}$ 、宽度 $20 \sim 30 \text{ m}$ 处对应水库水体,为水库水体的反映,水平距离 1 500 m 处的淡水体厚度突然增大,为古河床位置水体厚度较大所致;而水平距离 3 000~6 000 m 处剖面的绿色和红色区域为高阻基岩的反映。由此可见,在非盐渍化地区,吊舱系统可以有效地划分淡水体的赋存状态和分布范围。

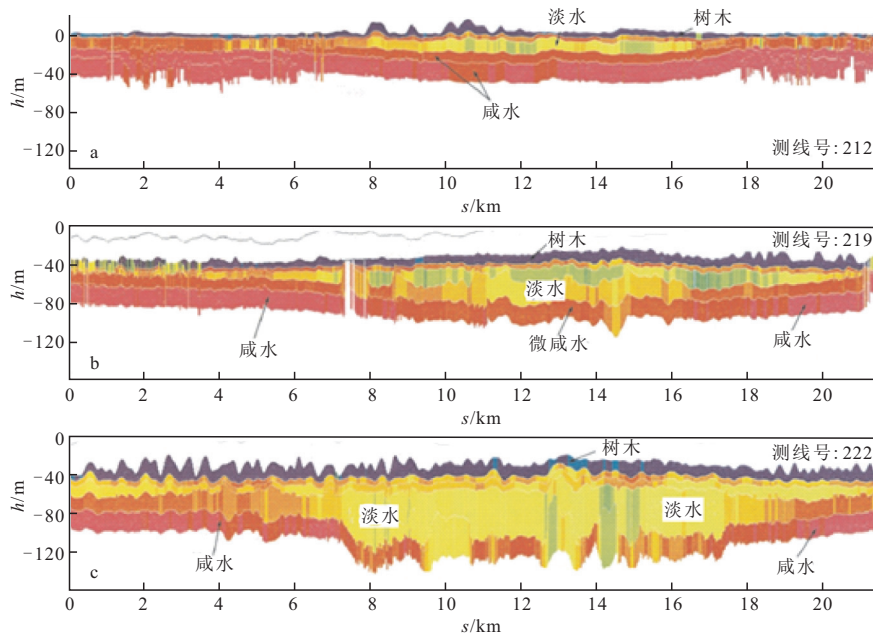
3.1.2 纳米比亚干旱地区寻找浅层淡水实例

图 9 为 FOGRO 公司利用 DIGHEM 吊舱系统在纳米比亚干旱地区寻找浅层淡水的实例,该图是由 5 个频率电磁数据转换的 3 个剖面电阻率—深度图像,其中深褐色为树林高度,深红色为低阻的咸水体,黄色和绿色为相对高阻的淡水体,由图 9 可以清晰地看出地下水质的纵向分布情况,而且 3 个剖面的电性特征分布类似,淡水体呈层状分布,绿色区域水质最好,黄色区域水质中等,淡水体赋存深度为 $10 \sim 50 \text{ m}$ 。从 212 剖面中段向 219、222 剖面中段淡水体厚度逐渐增大,但 219 剖面中段的水质最好。由此可见,在盐渍化地区,吊舱系统可以有效地探测

50 m 深度以内的淡水体赋存状态和分布范围。

3.1.3 山东潍坊地区研究海侵实例

图 10 为中国自然资源航空物探遥感中心利用固定翼系统在山东潍坊地区划分海侵程度的实例,该图为 3 个频率实虚分量转换的电阻率—深度断面图,图中东侧深蓝色、天蓝色、浅绿色区域电阻率小于 $25 \Omega \cdot \text{m}$,属于含咸水的区域,即在剖面水平距离 10.5 km 处为海侵界线,东侧为海侵区域,西侧为非海侵区域。在海侵区域内深蓝色部分电阻率小于 $7 \Omega \cdot \text{m}$,为强海侵区域,天蓝色区域电阻率为 $7 \sim 15 \Omega \cdot \text{m}$,属中等海侵区域,浅绿色区域电阻率为 $15 \sim 25 \Omega \cdot \text{m}$,为弱海侵区域,而局部的绿色和黄色区域(剖面水平距离 $12 \sim 13 \text{ km}$ 处),电阻率大于 $25 \Omega \cdot \text{m}$ 的区域可能为局部含淡水层。在非海侵区域,绿色区域可能为含淡水层,而红色区域可能为不含水层。由此可见,在盐渍化地区,固定翼系统可以有效地探测 50 m 深度以内的海侵程度和咸淡水界线。



s 表示水平距离, h 表示海拔, 绿色表示低电导率, 褐色表示高电导率

图 9 纳米比亚干旱地区航空电磁转换视电阻率—深度断面图

Fig.9 The resistivity-depth profile from airborne electromagnetic data in the arid area in Namibia

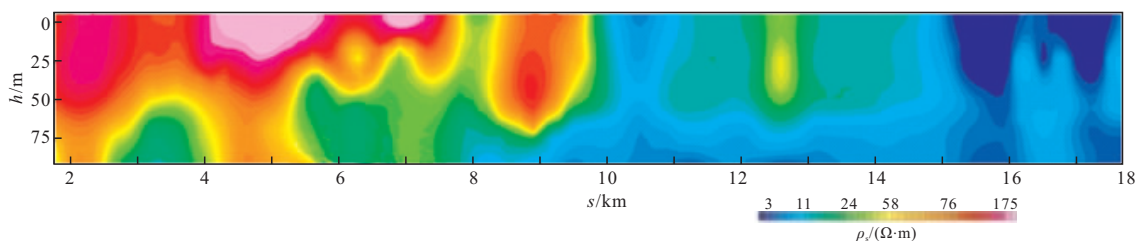


图 10 山东潍坊地区某剖面航空电磁转换电阻率—深度断面图

Fig.10 A resistivity-depth profile from airborne electromagnetic data in Weifang aea, Shandong

3.2 应用前景

通过吊舱系统和固定翼系统在典型水文地电模型条件下的探测深度分析,以及国内外实例应用情况表明,这2套系统在盐渍化水文地电条件下,通常可以探测到50~60 m深度以内的淡水体,在非盐渍化水文地电条件下,通常可以探测到100~130 m深度以内的淡水体。由此可见,频率域航空电磁系统适合东部沿海地区(盐渍化地区),以及内陆干旱地区(非盐渍化地区)的浅层淡水勘查任务。

在东部沿海地区,由于受海侵影响,大部分浅层地下水为咸水^[6-8],其中下辽河地区、德州至山海关地区、滨海至崇明岛地区海侵程度较为严重,利用航空电磁法研究海侵程度,划分海侵界线,圈定古河道,寻找淡水体,可以为东部沿海地区水资源管理和开发利用提供依据。在内陆干旱地区^[9-10],比如东北北部的西拉木伦河至齐齐哈尔地区、山西干旱地区严重缺水,利用航空电磁法可以寻找130 m深度以内的淡水体。在西南岩溶地区,地形崎岖,比高和坡度均较大,寻找对象一般为地下溶洞和暗河,溶洞直径一般为几米至几十米,赋存深度十几米至数百米,一般分布于山坡,因此地面物探施工难度较大。吊舱系统具有机动灵活和快速的优势,因岩溶地区为石灰岩分布区,其岩石电性呈高阻特征,而岩溶水呈相对低阻特征^[11],因此通过电阻率的分析对比,可以确定溶洞淡水体的范围。

4 结 论

(1)根据层状介质模型,建立了盐渍化地区、非盐渍化地区的典型水文地电模型,计算了吊舱系统和固定翼系统在不同埋藏深度下淡水体的电磁响应特征曲线,获得了这2套系统在不同水文地电条件下寻找淡水资源的探测能力。

(2)根据国内外典型地区频率域航空电磁法寻找淡水资源应用实例的分析表明,吊舱系统和固定

翼系统均可以在非盐渍化地区可以寻找130 m深度以内的淡水体,在盐渍化地区可以寻找60 m深度以内的淡水体。

(3)频率域航空电磁法适合东部沿海地区,以及内陆干旱地区的浅层淡水勘查任务。其中固定翼系统适合于中小比例尺的大范围水资源勘查任务,吊舱系统则适合于重点缺水地区的大比例尺,尤其是复杂地形地区的水资源详查任务。

参考文献:

- [1] 王卫平,王守坦.频率域航空电磁法及应用[M].北京:地质出版社,2011.
- [2] 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.
- [3] 王卫平,曾昭发,吴成平,等.基于磁导率的频率域航空电磁法双频反演方法[J].地质科技情报,2013,32(2):181-186.
- [4] 周道卿,谭林,谭捍东,等.频率域吊舱式直升机航空电磁资料的马奎特反演[J].地球物理学报,2010,53(2):421-427.
- [5] 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[J].海洋地质前沿,2016,32(9):58-63.
- [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.
- [7] 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):598-6042.
- [8] Steuer A, Siemon B, Grinat M. The german north sea coast in focus of airborne electromagnetic investigations: The freshwater lenses of borkum[C]//Proceedings of the 23rd Schmucker-Weidelt-Colloquium for Electromagnetic Depth Research, Seddiner See, 2010:188-197.
- [9] 满延龙.频率域航空电磁法浅层水资源调查的试验研究[J].地球物理学报,1990,33(5):604-610.
- [10] Siemon B, Christiansen A V, Auken E. A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration[J]. Near Surface Geophysics, 2009, 5(6):629-646.
- [11] Knight R, Smith R, Asch T, et al. Subsurface mapping with airborne electromagnetics in the Central Valley of California[C]//SEG International Exposition and 86th Annual Meeting, 2016:4926-4930.