

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.101

瞬变电磁法定量评估河流流域开采区富水性技术

牟 义^{1,2}, 李宏杰^{1,2}, 李 文^{1,2}, 黎 灵^{1,2}, 徐 慧^{1,2}, 姜 鹏^{1,2},
李江华^{1,2}, 邱 浩^{1,2}, 李 健^{1,2}, 王国库^{1,2}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室 (煤炭科学研究总院), 北京 100013)

摘要:为了查明河流下渗对露井联采采空区和回填区影响的范围及程度, 采用瞬变电磁法对鄂尔多斯呼和乌素沟与乌兰木伦河附近井工开采采空区及露天开采回填区进行探测试验, 根据距离河流的远近不同从“线、面、体”等角度全方位分析电性响应特征情况, 并结合物探区域内钻探抽水试验结果, 探讨瞬变电磁法定量探测富水性的可行性。结果表明: 瞬变电磁法可精确勘查河流流域露井协采煤矿浅埋深地质异常体(埋深不超过 150 m)富水范围及强度, 河流附近不含水(或弱含水)采空区高阻特征明显, 而河流附近含水回填区低阻特征明显; 附近河流对回填区影响较大, 横向可达 500 m, 回填区呈现明显的富水“漏斗”, 横向影响范围随深度增加缩小, 富水强度随深度增加也减弱, 基本与露天剥离回填空隙范围相吻合, 而附近河流对采空区及上部岩层影响较小, 横向不超过 80 m, 纵向主要影响采空区上部含水层, 对采空区补给较少, 采空区基本不含水(或弱含水); 尝试建立钻孔单位涌水量与视电阻率之间的关系式, 并用瞬变电磁法定量探测区域单位涌水量从而确定富水性等级。

关键词:瞬变电磁法; 采空区探测; 回填区探测; 抽水试验; 单位涌水量; 富水性等级

中图分类号: U448.213

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)04-011-14

Quantitative assessment of water richness in mining area of river basin by transient electromagnetic method

MU Yi^{1,2}, LI Hongjie^{1,2}, LI Wen^{1,2}, LI Ling^{1,2}, XU Hui^{1,2}, JIANG Peng^{1,2},
LI Jianghua^{1,2}, QIU Hao^{1,2}, LI Jian^{1,2}, WANG Guoku^{1,2}

(1. Mine Safety Technology Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, P. R. China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, P. R. China)

Abstract: In order to ascertain the scope and extent of the impact river infiltration on the exposed goaf and backfill area, we used the transient electromagnetic method to detect underground mining goaf and open-pit mining backfill near the Huhe Wusu Ditch and Ulan Moron in Ordos. According to the different distance from the river, the electrical response characteristics were analyzed from the unidimensional, planar, and

收稿日期: 2019-11-08 网络出版日期: 2020-01-19

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045001-004); 国家自然科学基金项目(51704162, 51804162)。

Supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2016ZX05045001-004) and the National Natural Science Foundation of China (51704162 and 51804162).

作者简介: 牟义(1983—), 男, 副研究员, 从事物探与防治水技术研究与应用工作, (E-mail)61673275@qq.com。

three-dimensional perspectives. Combined with the results of drilling pumping test in the geophysical exploration area, the feasibility of quantitative detection of water richness by transient electromagnetic method was discussed. The results show that the transient electromagnetic method can accurately survey the water-rich range and intensity of geological anomalies at a shallow buried depth not exceeding 150 m in the river basin. The high-resistance characteristics of the non-aqueous (or weakly-water-bearing) goaf near the river are obvious while the low-resistance characteristics of the water-filled backfill near the river are also obvious. The nearby rivers had a great influence on the backfilling area, to the lateral distance up to 500 m. The backfilling area presented a clear water-rich “funnel”. Both the lateral influence range and the water-rich intensity decreased with depth, which was basically consistent with the space scope of the open-air stripping backfill. And the nearby rivers had less impact on the goaf and the upper rock with the lateral distance less than 80 m, vertically mainly affecting the upper aquifer of the goaf, and the goaf was basically free of water, or weakly aquiferous. The relationship between the unit water inflow and the apparent resistivity of the drilling was established, and the use of transient electromagnetic method to quantitatively detect the unit water inflow and water-richness level was explored.

Keywords: transient electromagnetic method; goaf detection; backfill area detection; pumping test; unit water inflow; water-rich level

瞬变电磁法广泛应用于煤矿地面及井下,因具有施工便捷快速、受地形影响小、探测深度大、对含水水体反应敏感等优点,已成为探测采空区积水、构造富水区、含水层富水区分布范围的主要手段之一。随着瞬变电磁法技术的发展以及对煤矿防治水工作的日益重视,人们对瞬变电磁法探测煤矿水害的能力提出了更高的要求,逐步从传统定性探测富水体分布范围向探索研究定量探测富水体富水性的可行性转变。一些专家学者和技术人员已开展了相关研究。章俊^[1]进行了数值模拟和物理模拟试验,分析了灰岩含水量与电性参数、弹性波参数等之间的定量计算公式,得出煤层灰岩电性、弹性波等地球物理场响应特征以及与富水性之间的定量对应关系;刘盛东等^[2]采用物理模拟技术和并行电法检测了地电场参数,提出与水量变化相关的视电阻率和视极化率响应公式;李新凤^[3]和邱梅等^[4]采用岩性结构指数、物探及多因素综合分析法等相关成果,对煤层附近砂岩水害危险性进行评估,划分出不同危险性等级;徐慧^[5]在涌水量预测理论与方法基础上改进了涌水量计算方法,拓宽了适用性条件,采用模糊层次分析法建立了一套广泛适用的矿井涌水量预测评估技术体系。综合上述研究结果可以看出,物探量化探测尚处于起步阶段,大部分研究成果根据物理模拟或数值模拟获得,主要在未受开采影响的含水层理想条件下模拟,并且现场涌水量预测与物探结合较少。笔者从现场复杂开采条件出发,采用瞬变电磁法探测浅埋深井工开采采空区及露天开采回填区,寻求距离河流不同远近区域瞬变电磁法视电阻率响应特征,并探索寻找视电阻率与单位涌水量及富水等级之间的对应关系,达到定量探测的目的。

1 试验区概况

试验区位于乌兰木伦河西部,呼和乌素沟从西往东穿过试验区,乌兰木伦河与呼和乌素沟在矿区东部交汇,河谷均呈明显的 U 型,一级阶地发育,显著高出河床。乌兰木伦河在试验区东部边界由北向东通过,流经试验区东南部,常年有水,进入榆林地区后并入窟野河,最后成为黄河的支流。乌兰木伦河是井田流量最大的河流,全年平均流量 $3.13 \text{ m}^3/\text{s}$,有记录的最大流量 $1\,395 \text{ m}^3/\text{s}$,呼和乌素沟贯穿井田北部,从西往东汇入乌兰木伦河,季节对流量影响显著。两条河流位置见图 1。

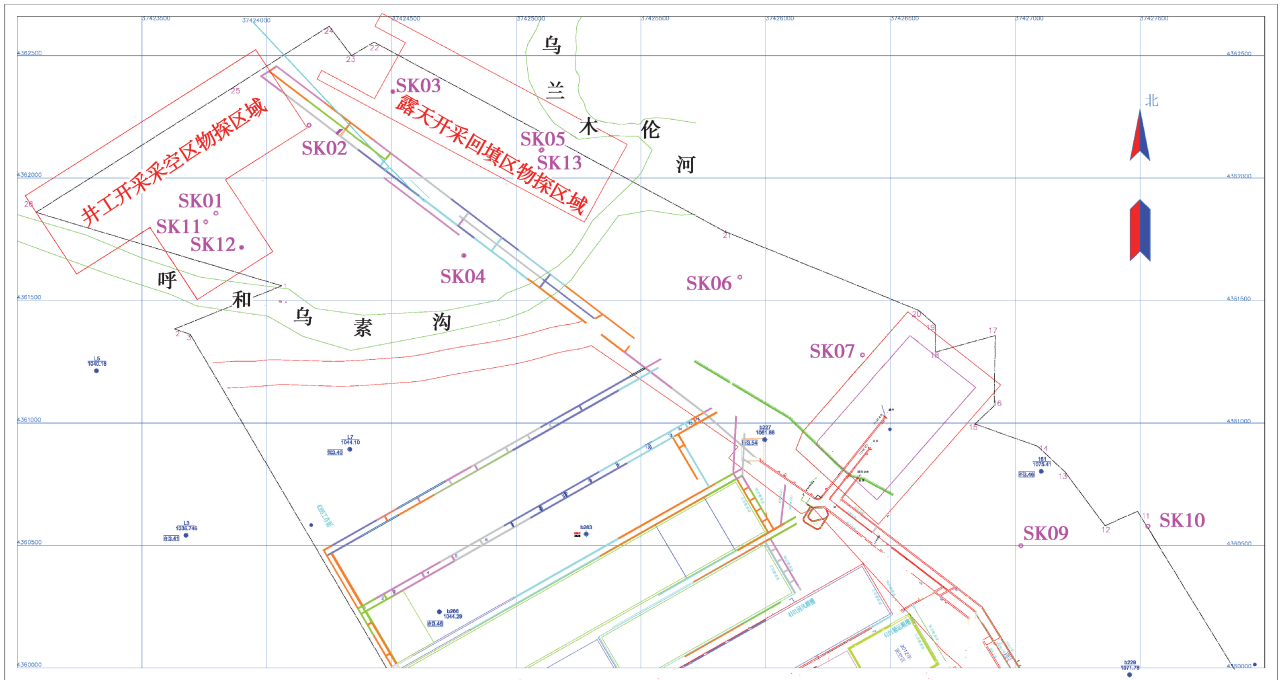


图1 试验区物探、钻探及河流位置图

Fig. 1 Geophysical exploration, drilling and river location map in the test area

试验区主要研究目标为3号煤和4号煤。3号煤层埋深较浅,小于150 m,平均为80 m,房柱式开采,试验区大部分范围3号煤层房柱式采空区已露天剥离治理并回填,只有西北部局部区域存在小煤窑房柱式或巷柱式采空区(3号煤层)。根据煤矿所提供的资料及现场调查初步结果显示,矿井西北部存在3号煤层房柱式采空区,井田东部存在大范围3号煤层剥离回填区,且房柱式采空区与回填区可能与地表河流沟通,存在大量直接补给,给煤矿安全生产带来较大的隐患。为查明该区域的采空区、回填区受河流影响分布范围以及含水层富水分布情况,特圈定了东北部和西北部2块区域进行瞬变电磁法探测,图1中东北部呼乌素沟和乌兰木伦河交汇处以西的物探区域为露天开采回填区,西北部呼乌素沟以北物探区域为井工开采区域,并在全矿布置了12个水文补勘钻孔,其中SK01、SK02、SK11、SK12、SK03、SK05以及SK13钻孔均位于物探区域之内。

2 瞬变电磁法理论与电性特征

2.1 瞬变电磁法理论

瞬变电磁法来源于法拉第的电磁感应定律^[6-7]。其基本工作方法是:在不接地线圈或接地导线中供以电流,在地面下方导电介质中感应产生电磁场,形成感应电流,在脉冲电流断电间隙,感应电流由于损耗而随时间衰减,其衰减时间因不同地下介质而不相同,但都为前期、中期和后期^[8]。前期衰减的一般都是高频电磁波,衰减时间短,深度一般位于近地表;而后期衰减的一般都是低频电磁波,衰减过程较长,深度一般较大^[9]。

对于水平层状介质,设计半径为 a 的圆形发射回线,地下水平层状介质层数为 n ,地下各层从上到下厚度为 $h_1, h_2, \dots, h_n \rightarrow \infty$;各层从上到下电导率为 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 。在此基础上建立柱状坐标系,原点位于回线中心, z 轴垂直向下。通过求解标量赫兹势的亥姆方程 $\nabla^2 F - \kappa^2 F = 0$,可得到回线源的谐变场的分量表达式^[10]:

$$E_\varphi = i\omega\mu_0 I_0 a \int_0^\infty \frac{Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

$$H_r = -I_0 a \int_0^\infty \frac{Z^{(1)} \lambda}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2)$$

$$H_z = I_0 a \int_0^\infty \frac{Z^{(1)} \lambda}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (3)$$

当接收点在回线中点时,则有:

$$E_\varphi = H_r = 0, \quad (4)$$

$$H_z = I_0 a \int_0^\infty \frac{Z^{(1)} \lambda}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) d\lambda, \quad (5)$$

$$V(\omega) = \frac{dB_z(\omega)}{dt} = -i\omega\mu_0 I_0 a \int_0^\infty \frac{\lambda Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) d\lambda. \quad (6)$$

式中: E_φ 为电场强度, V/m; H_r 为 r 轴向磁场强度, A/m; Z 为波阻抗, 空气层波阻抗 $Z_0 = -i\omega\mu_0/u_0 = -i\omega\mu_0/\lambda$; V 为感应电动势, V; ω 为频率, Hz; B_z 为 z 方向磁感应强度, nT; i 为虚数单位; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; I 为供电电流, A; λ 为波长, m; J_1 为一阶贝塞尔函数; a 为圆回线半径, m; H_z 为 z 轴向磁场强度, A/m; σ_n 第 n 层电导率, s/m; r 为收发距, m; t 为时间, s。 $Z^{(1)} = Z_1 \frac{Z^{(2)} + Z_1 \text{th}(u_1 h_1)}{Z_1 + Z^{(2)} \text{th}(u_1 h_1)}$, 其中 Z_1 , $Z^{(2)}$, u_1 由以下各式给出: $Z_j = -i\omega\mu_0/u_j$, $u_j = \sqrt{\lambda^2 + k_j^2}$, $k_j^2 = -i\omega\sigma_j\mu_0$, $Z^{(j)} = Z_j \frac{Z^{(j+1)} + Z_j \text{th}(u_j h_j)}{Z_j + Z^{(j+1)} \text{th}(u_j h_j)}$, $j = 1, 2, \dots, n$ (第 n 层地层), $Z^{(n)} = Z_n$ 。

由上面给出的谐变场表达式通过拉氏反变换得到阶跃电流激发下的瞬变场的表达式, 对应回线中心接收时的电磁场响应公式如下^[11]:

$$H_z(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Im} \left[I_0 a \int_0^\infty \frac{\lambda Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) d\lambda \right] \frac{\cos \omega t}{\omega} d\omega, \quad (7)$$

$$B_z(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Re} \left[I_0 a \int_0^\infty \frac{\lambda Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) d\lambda \right] \cos \omega t d\omega. \quad (8)$$

如令

$$H_z(b) = I_0 a \int_0^\infty \frac{\lambda Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} J_1(\lambda a) d\lambda, \quad (9)$$

则

$$H_z(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Im} [H_z(b)] \frac{\cos bt}{b} db, \quad (10)$$

$$\dot{B}_z(t) = \frac{4}{\pi \sigma_1 \mu_0 a^2} \int_0^\infty \text{Re} [H_z(b) \cos bt] db. \quad (11)$$

式中 b 为归一化频率, $b = \sigma_1 \mu_0 \omega a^2 / 2$ 。

令 $b = B^2$, 则感应数 $B = \sqrt{b} = a/\delta$, 其中 δ 为趋肤深度, $\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma_1 \mu_0 \omega}}$ 。

式(9)中的 $H_z(b)$ 为 λ 的单调函数, 因此对式(9)进行的汉克尔变换需要增加滤波系数和计算褶积次数, 极大降低了运算速度。为了提高式(9)的收敛速度和运算速度, 将积分核变换为 $\lambda \left[\frac{Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} - \frac{1}{2} \right]$, 于是式(9)变换为^[12]:

$$H_z(b) = I_0 a \int_0^\infty \lambda \left[\frac{Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} - \frac{1}{2} \right] J_1(\lambda a) d\lambda + \frac{I_0}{2a}. \quad (12)$$

由于 $\lambda \left[\frac{Z^{(1)}}{Z^{(1)} + Z_0} - \frac{1}{2} \right]$ 在 λ 的局部范围内增大呈现单峰曲线, 故需要在积分核不为零的局部有限范围内进行褶积计算, 并采用 3 次样条插值进行插值计算, 可极大提高计算速度^[13]。

为了减少反演的多解性, 使用改进的阻尼最小二乘法求解下列方程^[14]:

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + a\mathbf{I}) \Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^T \mathbf{B}, \quad (13)$$

式中: \mathbf{A} 为雅可比矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; a 为阻尼因子; \mathbf{B} 为精度评价向量函数; $\Delta \mathbf{X}$ 为 \mathbf{X} 变量增量。

对试验区所采集的瞬变电磁数据按照上述正反演方法分别进行一维、二维和三维对比分析解释,形成单支曲线、剖面 and 立体成果,初步进行定量解释。

2.2 电性特征分析

当岩层层序均匀稳定,不含明显的构造、采空区、回填区、含/积/富水区时,岩层由浅至深的电阻率呈现较稳定的“低阻—高阻—低阻”趋势特征;相反,岩层层序无序、不稳定,构造、采空区、回填区、含/积/富水区明显时,岩层电阻率特征呈现无规律性,出现局部突然增大或局部突然减小情况^[15]。当煤层采空后,由于采空区及其顶板发育了大量的空洞和裂隙,电阻率对比正常岩层会有明显的差异,当煤层中存在不含水或弱含水采空区时,其电阻率通常会高于周边煤层及围岩,当煤层存在一定积水量的含水采空区时,其电阻率通常会低于周边煤层及围岩;同理,当煤层采空被回填后,由于回填区填充不严实发育大量裂隙、破碎空洞等,整体电阻率与正常岩层会有明显差异,当回填区基本不含水时,其电阻率整体高于正常岩层,当回填区充水达一定程度时,其电阻率会普遍降低,通常会低于周边不含水岩层^[16]。研究区露天剥离完3煤后,将排土场的黄土、砂石等回填到采坑中,覆盖表土,由于回填时间不超过10年,回填区中存在大量砂石等,形成了较多破碎空洞,地表存在一定的裂隙、塌陷,密实程度较差,雨季大量雨水渗入回填区,地表形成较多冲沟。周边大多为黄土高原地形,地势较高,有较厚的黄土层,雨水、河流不易渗入,而回填区一般地势较平,地表有凹陷、冲沟等,内部空洞、裂隙发育,河流、雨水较易渗入,形成与周边岩土体差异明显的电性特征。

3 不同含水条件电阻率响应规律研究

3.1 典型曲线

选取不同含水电性条件下的单个测点典型衰减曲线,通过对比不同地层、地质体、含水体情况下测点之间单支曲线的衰减速度及圆滑程度的差异,定性分析地下地质体引起的异常。

3.1.1 不同距离采空区

在西北部呼和乌素沟影响的物探区域选取8个测点,测点分别距离呼和乌素沟0,20,40,60,80,100,120,140 m,形成归一化感应电压曲线、视电阻率曲线,如图2和图3所示。分析8条曲线形态特征及随距离增加时曲线变化趋势,初步判断河流对采空区影响的范围及程度。

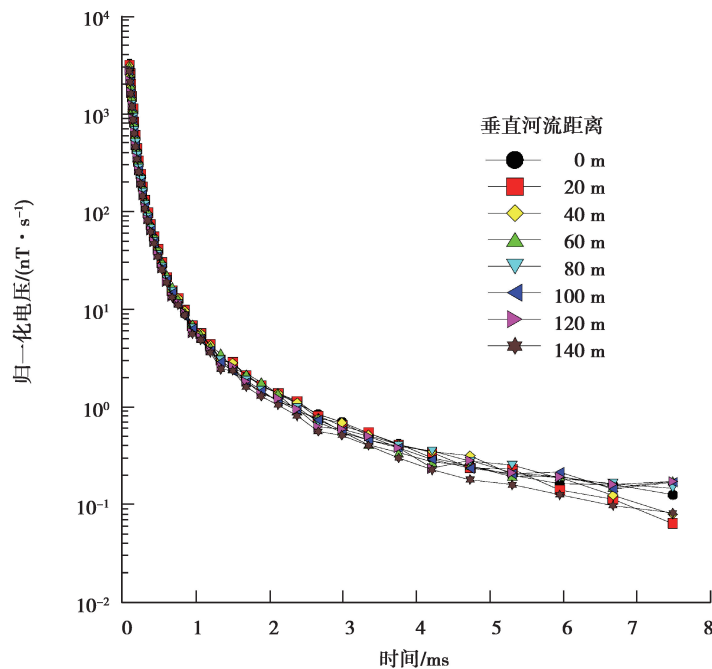


图2 距河流不同垂直距离采空区归一化电压—时间曲线

Fig. 2 Normalized voltage-time curve at different distances

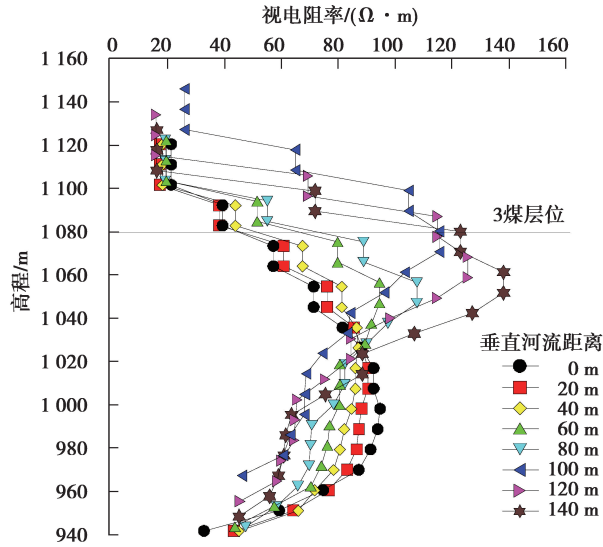


图 3 距河流不同垂直距离采空区视电阻率曲线

Fig. 3 Apparent resistivity-elevation curve at different distances

图 2 可以看出归一化电压曲线均较圆滑,随着远离河流,曲线电压有整体降低的趋势。图 3 不同曲线视电阻率值整体变化也较明显,其中 0, 20, 40, 60, 80 m 视电阻率值曲线在 3 煤深度附近表现低阻异常反应; 100, 120, 140 m 曲线在 3 煤附近起伏增大, 跳跃性较明显, 视电阻率值出现异常增大。结合现场地质条件, 推断河流影响范围为 80 m: 80 m 之内呈现低阻含水特征, 为河流下渗影响范围, 超出 80 m 之后, 视电阻率值出现明显增大, 采空区区域呈现高阻不含水特征。

3.1.2 不同距离回填区

在东北部呼和乌素沟和乌兰木伦河交叉影响的物探区域选取 8 个测点, 测点分别距离乌兰木伦河 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 m, 构建归一化感应电压曲线和视电阻率曲线, 如图 4 和图 5 所示。分析 8 条曲线形态特征及随距离增加时曲线变化趋势, 初步分析河流在回填区中的影响范围。

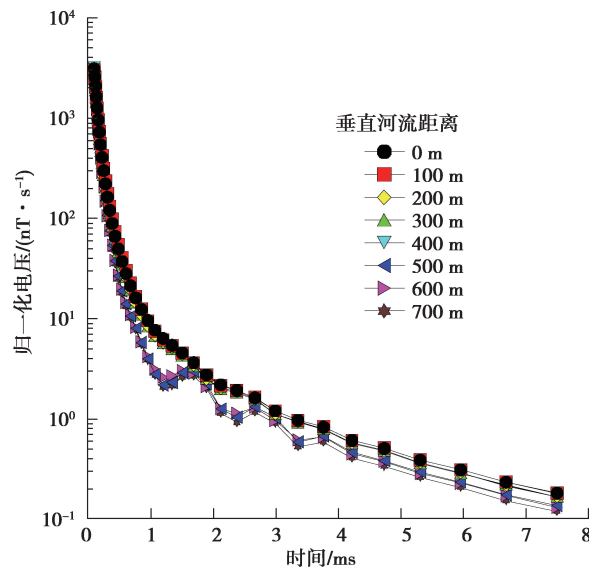


图 4 距河流不同垂直距离回填区归一化电压-时间曲线

Fig. 4 Normalized voltage-time curve at different distances

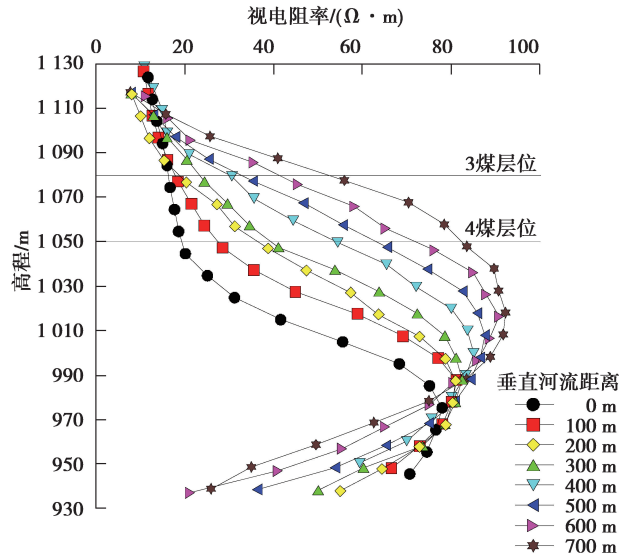


图5 距河流不同垂直距离回填区视电阻率-高程曲线

Fig. 5 Apparent resistivity-elevation curve at different distances

图4可以看出部分归一化电压曲线较圆滑,随着距离增大,曲线起伏增大,归一化电压值有降低的趋势。图5中,0,100,200,300,400,500 m曲线在3煤附近均呈现较低视电阻率值,600,700 m曲线在3煤出现了较正常的视电阻率特征;0,100,200 m曲线在4煤附近也出现了较低视电阻率值,300,400,500,600,700 m曲线在4煤出现了较为正常的视电阻率特征,结合现场地质条件,推断河流影响范围到达4煤,其中3煤距离河流500 m回填区均在影响范围之内,而4煤正常煤层受上部回填区含水水体影响在距离河流200 m范围之内。

3.2 典型剖面

试验区3煤底板标高+1 080~+1 090 m左右,平均埋深约80 m,4煤底板标高约+1 050~+1 060 m,平均埋深约110 m,均为浅埋深煤层,倾角近似水平,根据煤层的底板标高情况分析3煤、4煤深度附近的电阻率特征。图6和图7分别是典型采空区和回填区视电阻率剖面图,其中横坐标为水平距离(单位:m),纵坐标为高程(单位:m);采用蓝色、青色填充反演电阻率相对低的区域,黄色、红色填充反演电阻率相对高的区域,其他为中间过渡色;图中3煤、4煤用黑色粗虚线表示,相对高阻异常用蓝线表示,相对低阻异常用红线表示,针对不同异常进行了编号。

3.2.1 井工开采采空区

图6为典型垂直呼和乌素沟走向采空区探测剖面图,位于西北部物探区域,测线起点0 m处位于呼和乌素沟附近,地表高差约80 m。3煤附近整体视电阻率较高。图6中发现3处异常区域,分别是:低阻异常1(0~80 m处)、高阻异常1(110~580 m处)和高阻异常2(690~1 100 m处)。低阻异常1推断为河流下渗影响区域,高阻异常1、高阻异常2推断为不含水或弱含水采空区。从横向上看,呼和乌素沟影响低阻异常1,影响范围为80 m,与单支曲线分析结果一致;纵向上看,河流下渗延伸到+1 080 m左右,到达3煤。

3.2.2 露天开采回填区

图7为典型垂直乌兰木伦河走向回填区探测剖面图,位于东北部物探区域,测线尾部1 280 m处位于乌兰木伦河附近,地表测点平均高差约80 m。3煤层位视电阻率整体较低,剖面中发现4处相对明显异常区:低阻异常1(1 080~1 280 m处)、低阻异常2(780~1 080 m处)、高阻异常1(540~780 m处)和高阻异常2(320~480 m处),低阻异常1和低阻异常2均推断为富水回填区,高阻异常1和高阻异常2均推断为不含水或弱含水回填区。从横向上看,乌兰木伦河影响3煤回填区范围约为500 m,影响4煤范围约为200 m,与单支曲线分析结果一致;纵向上看,河流下渗延伸到+1 050 m左右,到达4煤。

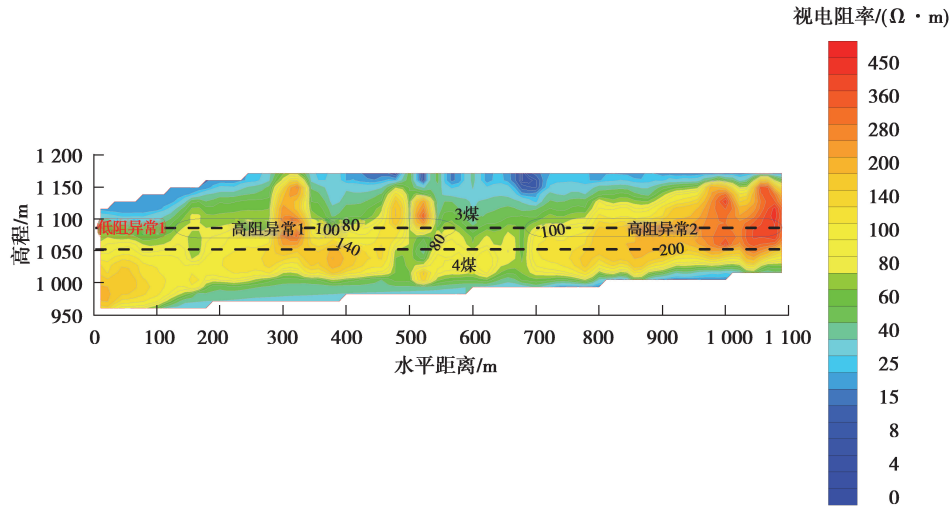


图 6 典型垂直河流采空区探测剖面

Fig. 6 Typical detection profile of the goaf vertical to the river

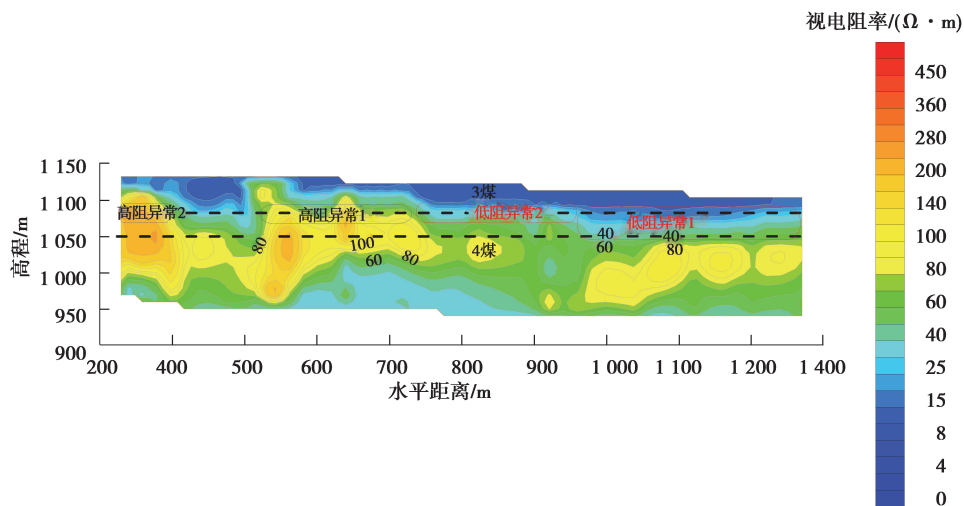


图 7 典型垂直河流回填区探测剖面

Fig. 7 Typical detection profile of backfill vertical to the river

3.3 立体成果

通过将测线数据赋予三维坐标形成三维立体数据,在高程+1 130~+1 030 m 之间进行切片,形成了+1 130~+1 030 m 每隔 10 m 一张的切片图,形象立体地展示了河流立体运移情况及采空区、回填区富水分布情况。

3.3.1 井工开采采空区

图 8 为井工开采区域探测立体成果图,图中切片纵向上由浅至深、横向上距离河流从近到远电阻率总体上呈现增大的变化趋势。横向上浅部高程+1 090 m 以上切片离河流较近区域低阻异常范围较大,受呼和乌素沟影响明显;高程+1 090 m 以下 3 煤、4 煤等切片低阻异常范围最小,甚至没有低阻异常,说明富水性较弱(或不含水),说明 3 煤及以下受河流下渗影响较小或未受影响,进而说明下部裂隙较不发育或存在少量不连通裂隙,因此,结合实际地质、采掘、钻探等资料进行综合分析,推断呼和乌素沟影响深度最大到+1 080 m 处(3 煤附近)。

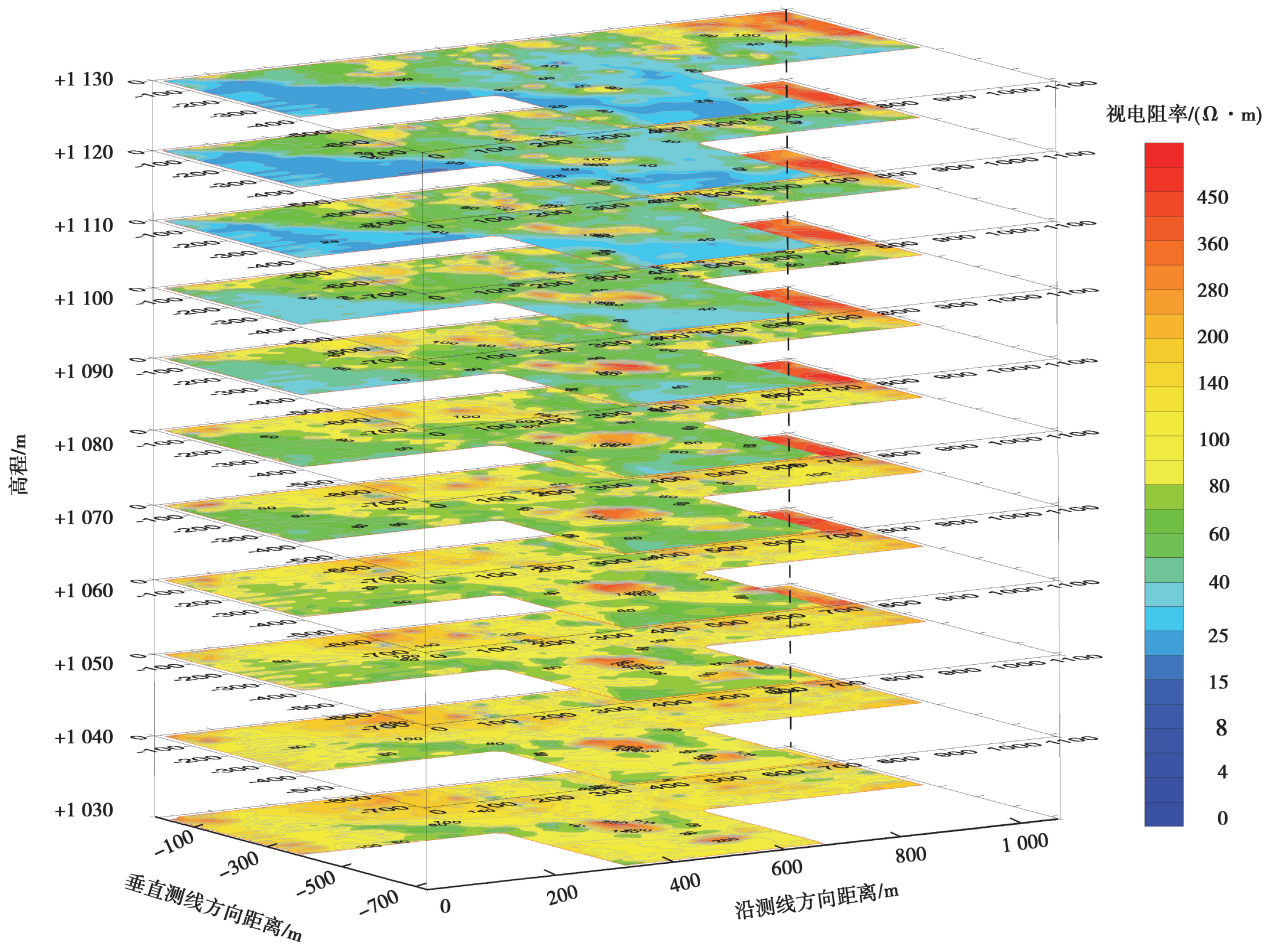


图8 采空区探测立体切片图

Fig. 8 Slices of three-dimensional view of the goaf area detection

3.3.2 露天开采回填区

图9为东北部物探区域立体探测成果图,呈现与图8类似趋势,不同之处在于低阻异常范围及程度更明显。横向上高程+1050 m以上切片低阻异常范围最大,低阻阻值较低,富水性强,且在远离河流过程中视电阻率值有增大趋势,说明受乌兰木伦河和呼和乌素沟影响剧烈,下渗影响范围及程度均较大;+1050 m以下切片低阻异常范围较小,甚至没有低阻异常,说明富水性较弱,受河流下渗影响较小或未受影响,进而说明4煤以下裂隙较不发育或存在少量不连通裂隙。因此,推断乌兰木伦河、呼和乌素沟影响深度最大到+1050 m处(4煤附近),局部影响到+1080 m处(3煤附近)。

3.3.3 综合分析

通过分析3煤采动情况及受呼和乌素沟、乌兰木伦河补给情况,可以看出西北部井工开采3煤区域存在多处明显高阻异常,低阻异常较少且不明显,推断呼和乌素沟对西北部井工开采采空区补给量较少。东北部回填区与西北部采空区差别较大,可以看出东北部区域位于呼和乌素沟和乌兰木伦河交汇处,回填区裂隙、破碎带发育,受河流影响较大,整体阻值偏低,该区域有大范围、大面积含水,推断东北部露天回填区受河流补给强富水,已形成联通。试验是在冬季开展的,在全年中河流水量最小,而随着雨季到来,河流升高,补给量增大,回填区富水区分布范围将会增大,形成向西北延伸的趋势。

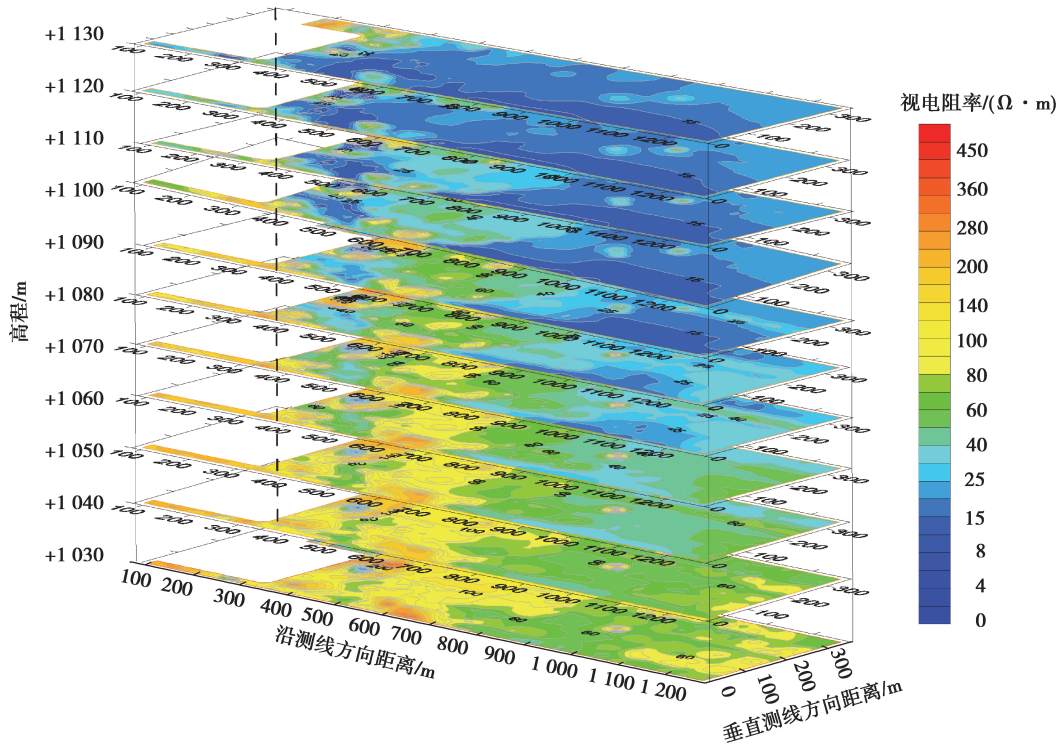


图 9 回填区探测立体切片图

Fig. 9 Slices of three-dimensional view of the backfill area detection

4 瞬变电磁法定量评估涌水量试验

前文通过瞬变电磁成果定性展示了采空区及回填区富水范围及强度差异,下面将瞬变电磁法探测结果与常规钻孔抽水试验单位涌水量相结合,尝试采用瞬变电磁法进行涌水量定量探测^[17-18]。将物探西北部区域(采空区)SK1、SK2、SK12 和东北部区域(回填区)SK5 钻孔抽水试验测得的 3 煤顶板单位涌水量,与瞬变电磁法在相应钻孔位置的 3 煤顶板反演计算的视电阻率值建立联系,形成钻孔单位涌水量和视电阻率值响应关系曲线(图 10),通过数据拟合,得到关联函数。拟合公式如下:

$$y = 3 \times 10^9 x^{-5.855}, \tag{14}$$

式中: x 为单位涌水量, $L/(s \cdot m)$; y 为视电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

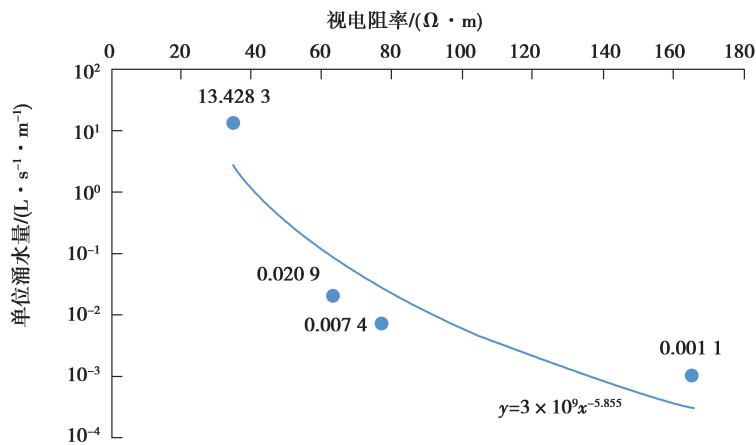


图 10 钻孔单位涌水量与视电阻率关系曲线(3 煤层顶板)

Fig. 10 Relationship between unit water inflow and apparent resistivity of the drilling (roof of No. 3 coal seam)

根据式(14)建立钻孔中视电阻率和单位涌水量之间的关系,将关系式推广到整个物探区域,把瞬变电磁法探测区域 3 煤顶板的视电阻率通过式(14)换算成钻孔单位涌水量,拟合形成单位涌水量平面图,如图 11 所示。图中从暖色调(红色)到冷色调(蓝色)单位涌水量逐渐增大^[19-20]。可以看出,高视电阻率区域单位涌水量计算值较低,反之亦然。西北部瞬变电磁法探测区域大部分区域的单位涌水量计算值低于 0.1 L/(s · m),局部受呼和乌素沟影响区域(距离 80 m 之内)的单位涌水量计算值位于 0.1~1.0 L/(s · m)之间,说明 3 煤采空区受河流补给较少,基本不受影响;而东北部大部分露天开采回填区的单位涌水量计算值明显高于 5.0 L/(s · m),与西北部井工开采区域采空区差别明显,单位涌水量猛增,甚至高达几十倍,说明东北部 3 煤上方回填区受乌兰木伦河和呼和乌素沟下游较大河水影响,破碎裂隙和空洞发育,联通性强,渗入充足,富水性强。

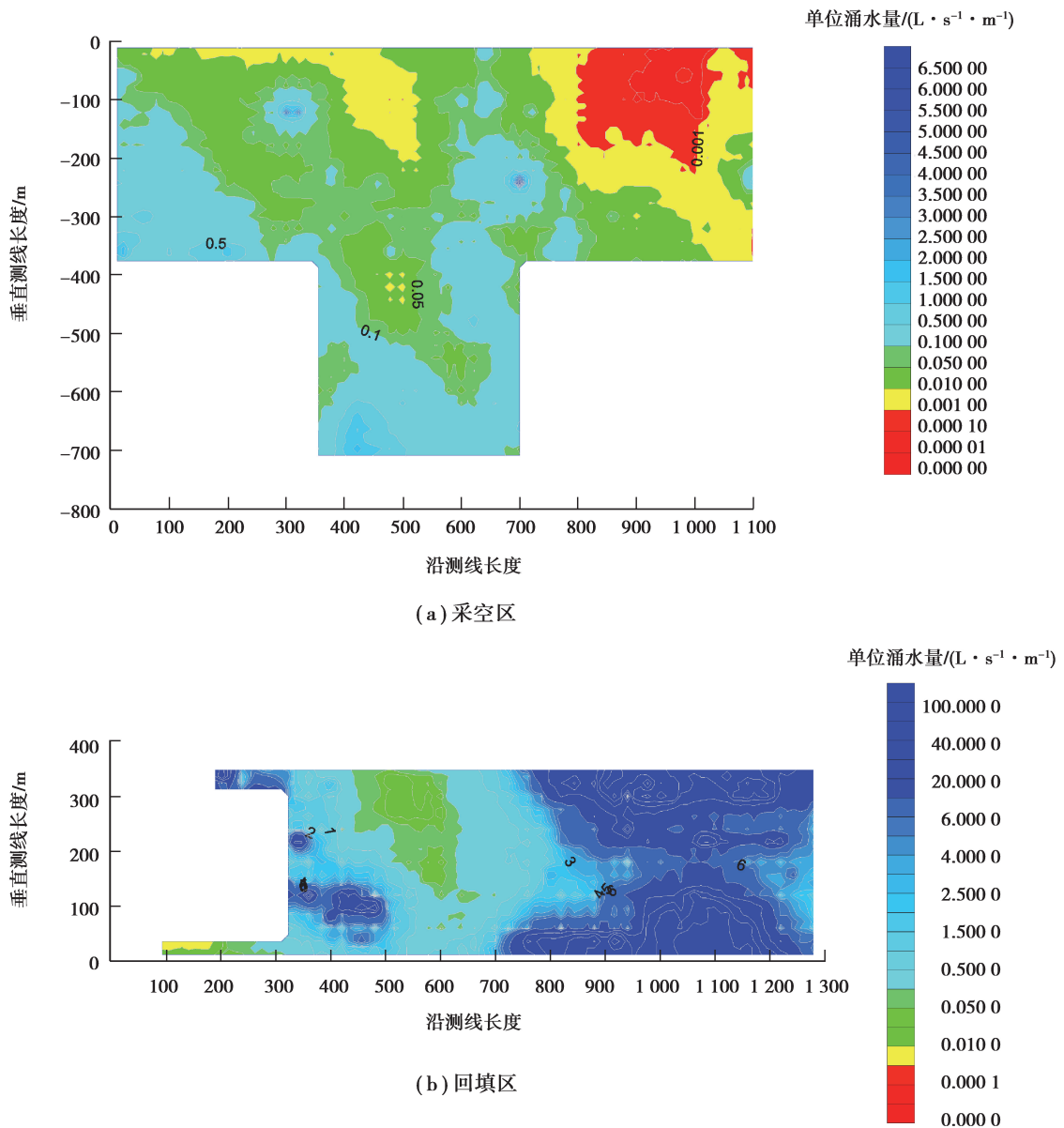


图 11 物探区域单位涌水量平面图

Fig. 11 Plan of unit water inflow in the geophysical area (roof of No. 3 coal seam)

新版《煤矿防治水细则》(2018年)^[21]中规定:“按照钻孔涌水量 q 值大小将含水层富水性分为4个等级:1)弱富水性: $q \leq 0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$;2)中等富水性: $0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}) < q \leq 1.0 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$;3)强富水性: $1.0 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}) < q \leq 5.0 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$;4)极强富水性: $q > 5.0 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。”据此将物探区域单位涌水量划分成4个等级,形成富水性等级图,如图12所示。图中红色表示弱富水性(含水较少或不含水区域),绿色表示中等富水性(含水一般区域),青色表示强富水性(强含水区域),蓝色表示极强富水性(极强含水区域)。可以看出西北部物探区域远离呼和乌素沟大部分区域属弱富水区,靠近呼和乌素沟区域属中等富水区;东北部物探区域靠近呼和乌素沟和乌兰木伦河交汇区域接近一半面积属极强富水区,中部、西部零散分布强富水区、中等富水区和弱富水区。

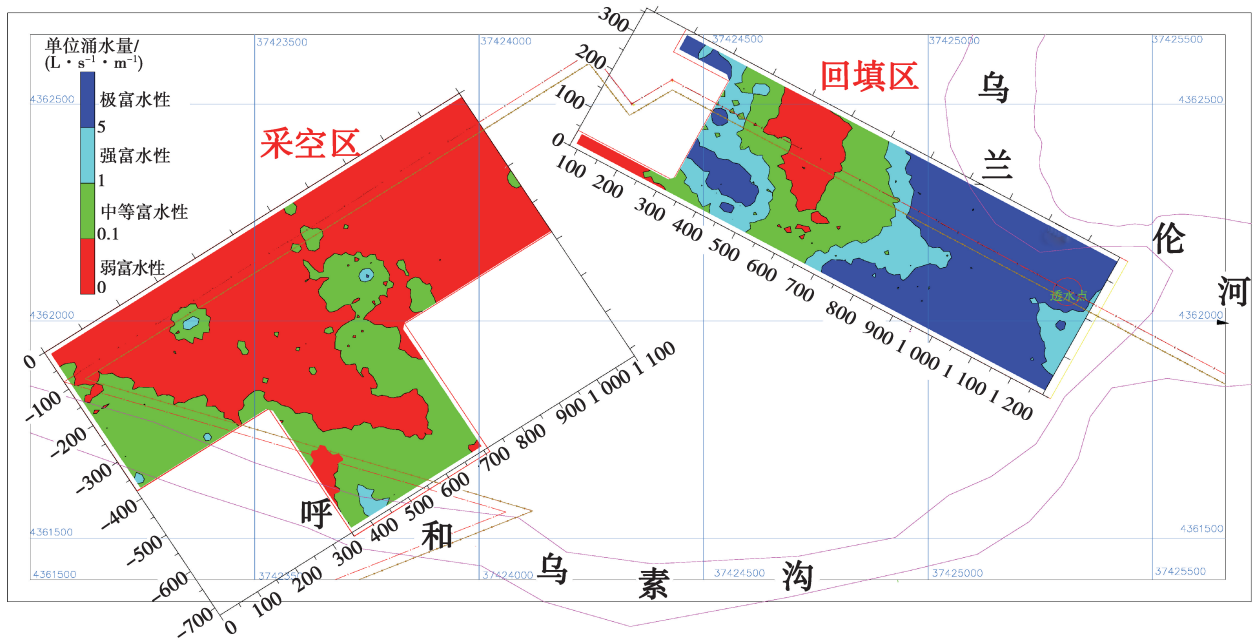


图 12 物探区域富水性等级图(3 煤层顶板)

Fig. 12 Water-rich level map of geophysical exploration area (roof of No. 3 coal seam)

5 结论与建议

笔者在河流流域复杂开采条件下的井工开采采空区及露天开采回填区采用瞬变电磁法进行了探测试验研究,从多维角度分析了不同开采条件的地质异常体电性响应特征,查明了河流对浅埋深采空区及回填区的影响范围及程度,并尝试将钻孔单位涌水量与视电阻率建立关系,探索瞬变电磁法定量探测区域单位涌水量并划分富水等级,得出结论如下:

1)瞬变电磁法探查河流流域复杂开采条件下浅埋深地质异常体(一般影响深度不超过 150 m)是可行的,可以看出明显电性响应特征差异,经打钻及抽水试验表明,采空区分布范围误差不超过 5 m,且大部分区域单位涌水量 $q \leq 0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,属于不富水(或弱富水),回填区富水区分布范围误差不超过 10 m,且大部分区域单位涌水量 $q > 0.1 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$,属于中等、强和极强富水,应用效果较好。

2)瞬变电磁法可以查明河流对不同开采条件形成的浅埋深地质异常体的影响范围及程度,河流对回填区影响的范围较大,可达 500 m,影响的强度也较大;对采空区影响的范围较小,仅 80 m 之内,影响的强度也较弱;且河流对回填区影响的深度比对采空区大。

3)笔者尝试建立了钻孔测得单位涌水量与视电阻率之间的关系式,探讨了用瞬变电磁法定量探测区域单位涌水量富水性等级。

本次试验是在全年水流量最小的冬季进行的,由于河流水流量受季节影响动态变化,河流对采空区及回填区影响的范围及程度也将动态变化。另外,由于物探区域抽水试验钻孔较少,一定程度上影响钻孔单位涌水量与视电阻率之间的关系式的准确度,后续有待构建电磁法和水文地质参数的大数据平台,在实验室试验和数值模拟基础上,构建预测判别模型,开展基于电磁法的含水层水文地质参数半定量或定量研究。

参考文献:

- [1] 章俊. 煤层底板灰岩富水性定量综合物探研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2015.
ZHANG Jun. Study on the quantitative comprehensive geophysical prospecting of the water abundance of the coal seam floor limestone[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese)
- [2] 刘盛东, 杨胜伦, 曹煜, 等. 煤层顶板透水水量与地电场参数响应分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(3): 341-345.
LIU Shengdong, YANG Shenglun, CAO Yu, et al. Analysis about response of geoelectric field parameters to water inrush volume from coal seam roof[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(3): 341-345. (in Chinese)
- [3] 李新风. 砂岩含水层富水性预测及水害危险性评价研究[D]. 山东青岛: 山东科技大学, 2010.
LI Xinfeng. Water abundance forecast and water disaster danger evaluation study of sandstone aquifers[D]. Qingdao, Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [4] 邱梅, 施龙青, 滕超, 等. 基于灰色关联-FDAHP法与物探成果相结合的奥灰富水性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3203-3213.
QIU Mei, SHI Longqing, TENG Chao, et al. Water-richness evaluation of Ordovician limestone based on grey correlation analysis, FDAHP and geophysical exploration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3203-3213. (in Chinese)
- [5] 徐慧. 矿井涌水量预测研究[D]. 河北廊坊: 华北科技学院, 2015.
XU Hui. Study of the mine water inflow prediction[D]. Langfang, Hebei: North China Institute of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] Zhao Y W, Zhu Z Q, Lu G Y, et al. The optimal digital filters of sine and cosine transforms for geophysical transient electromagnetic method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 150: 267-277.
- [7] Su B, Yu J C, Sheng C X. Maxwell-equations based on mining transient electromagnetic method for coal mine-disaster water detection[J]. Elektronika Ir Elektrotehnika, 2017, 23(3): 20-23.
- [8] Zhu X G, Fu Z H, Su X F, et al. Frequency-domain analysis for pulse current sources in transient electromagnetic method[J]. Near Surface Geophysics, 2017, 15(2): 155-162.
- [9] Yu C G, Fu Z H, Wu G L, et al. Configuration detection of substation grounding grid using transient electromagnetic method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6475-6483.
- [10] 牟义. 浅埋采空区瞬变电磁法响应特征试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(10): 203-208.
MU Yi. Experimental study on response characteristics of transient electromagnetic method in shallow gob[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 203-208. (in Chinese)
- [11] Zhang X, Qiao W, Chen Y K. 3D visualization of the VTK and Qt based mine transient electromagnetic method [J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 2016, 63(12): 593-598.
- [12] Hu B, Yu R Q, Liu J. Experimental study on the corrosion testing of a buried metal pipeline by transient electromagnetic

- method[J]. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2016, 63(4): 262-268.
- [13] 牟义. 典型地质异常体电磁法响应特征研究[J]. *煤矿开采*, 2017, 22(4): 4-9.
MU Yi. Study of electromagnetic response characteristics of typical geological anomalous body [J]. *Coal Mining Technology*, 2017, 22(4): 4-9. (in Chinese)
- [14] Li G, Shi J, Yu S B. A novel three-phase to single-phase matrix converter-based transient electromagnetic transmitter[J]. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2017, 28(5): 635-643.
- [15] Xi Z Z, Long X, Huang L, et al. Opposing-coils transient electromagnetic method focused near-surface resolution [J]. *Geophysics*, 2016, 81(5): E279-E285.
- [16] Hu B, Liu J, Yu R Q. The application of transient electromagnetic method in detecting the corrosion of heat distribution pipeline[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 556/557/558/559/560/561/562: 3052-3055.
- [17] 牟义, 徐慧, 马志超, 等. 带压综采工作面矿井综合物探及安全性评价研究[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(12): 41-49.
MU Yi, XU Hui, MA Zhichao, et al. Comprehensive geophysical exploration and safety evaluation of the mine with a fully mechanized pressurized mining face[J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(12): 41-49. (in Chinese)
- [18] 程久龙, 潘冬明, 李伟, 等. 强电磁干扰区灾害性采空区探地雷达精细探测研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(2): 227-231.
CHENG Jiulong, PAN Dongming, LI Wei, et al. Study on the detecting of hazard abandoned workings by ground penetrating radar on strong electromagnetic interference area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(2): 227-231. (in Chinese)
- [19] Xue G Q. The development of near-source electromagnetic methods in China[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2018, 23(1): 115-124.
- [20] 黎灵, 舒宗运, 冯宇锋. 特厚煤层综放开采覆岩离层水突水机理分析及防治[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(1): 175-182.
LI Ling, SHU Zongyun, FENG Yufeng. Analysis and prevention on mechanism of water inrush from bed separation water of overburden by fully-mechanized top coal caving mining in ultra thick seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(1): 175-182. (in Chinese)
- [21] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
National Coal Mine Safety Administration. Detailed rules and regulations for water hazard prevention and control in coal mines [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2018. (in Chinese)

(编辑 罗 敏)