郑海山，周 建. 煤矿深层开采地质沉陷灾害信息整合技术[J]. 灾害学，2020，35(2)：22-25. [ZHENG Haishan and ZHOU Jian. Information Integration Technology of Geological Subsidence Disaster in Deep Mining[J]. Journal of Catastrophology，2020，35(2)：22-25. doi：10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2020. 02. 005.]

煤矿深层开采地质沉陷灾害信息整合技术*

郑海山[1,2]，周 建[3]

(1. 山西大学，山西 太原 030006；2. 阳泉煤业(集团)有限责任公司，山西 阳泉 045000；
3. 武汉理工大学，湖北 武汉 430070)

摘 要：采用当前方法整合煤矿深层开采地质沉陷信息时，整合得到地质沉陷值与实际地质沉陷值之间的误差较大，存在整合精度低的问题，为此该文提出煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法，首先分析煤矿深层开采的地质沉陷机理，根据分析获取的信息，沿走向对煤矿深层开采工作面进行划分，获得多个开采单元。在此基础上，通过整合单元动态移动变形值实现煤矿深层开采地质沉陷信息的整合。实验结果表明，整合得到的地质沉陷值与实际地质沉陷值基本相符，整合绝对百分误差值较小，提高了煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法的整合精度。

关键词：煤矿；深层开采；地质沉陷；信息整合；整合单元
中图分类号：TU433；X43；X915. 5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2020)02－0022－04
doi：10. 3969/j. issn. 1000－811X. 2020. 02. 005

我国绝大部分的电力是通过煤矿资源获取的，而且煤矿资源被广泛的应用在化工、建材和冶金等领域中[1-3]。开采煤矿资源的过程中会出现采空区塌陷，煤矿深层开采地质沉陷地表岩土体的形态和位置在开采过程中发生变化，具有危害大、发生缓慢、不易察觉和历时长等特点，是一种渐进式的地质灾害[4]。地质沉陷不仅会导致泥石流、滑坡和崩塌等地质灾害，还会造成地下水位污染下降、土地资源破坏、交通道路变形、建筑物受损和地貌景观破坏，对周边和矿区居民的生命安全和财产安全造成极大的威胁[5]。地质沉陷信息整合技术是有效避免和预防采空区地质沉陷的手段，当前地震沉陷信息整合技术方法存在整合精度低的问题，需要对地质沉陷信息整合技术进行分析和研究，相关学者在此进行大量研究。

麻凤海等[6]提出地铁盾构施工引起的地表沉降研究，基于煤矿深层开采的相关数据将沉降槽宽度修正系数和地面最大沉降修正系数引入 Peck 理论公式，对修正系数的取值范围进行调整，通过调整后的 Peck 公式整合地质沉陷信息。严皓等[7]提出基于地震属性的中深层薄砂层厚度定量整合，通过谱反演技术对地震沉降信息的分辨率进行分析，获取地质沉陷的不同属性，构建地质沉陷和岩土之间的拟合关系，根据拟合关系实现地质沉陷信息的预测。

以上两种方法整合得到的地质沉陷信息与实际地质沉陷信息不符，存在整合精度低的问题，为了解决上述方法中存在的问题，提出煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法。

1 地质沉陷机理影响因素

煤矿深层开采地质沉陷的影响因素主要包括两个方面，分别是人为因素和自然因素[8]。其中自然因素包括盆地沉积物的构造、压实沉降、土地湿陷性压密、盐矿塌陷、岩溶塌陷、有机质土排水固结；人为因素主要包括地下流体和地下矿体的开采，引起煤矿深层开采地质沉降的主要因素是地下水的开采。

根据有效应力可知，水的压力 p 和土骨架应力 e' 与水和土在某平面中全部重量对应的总压力相同：

$$e = e' + p。 \tag{1}$$

式中：e 代表的是覆盖层荷载对应的总应力。在含水层中的应力和压力关系如图 1 所示。

* 收稿日期：2019－11－30　　修回日期：2020－01－28
基金项目：国家自然科学基金项目(51804006)
第一作者简介：郑海山(1964－)，男，山西泉阳人，高级经济师，研究方向为信息化. E-mail：zhangyufei-1981@163. com
通讯作者：周建(1967－)，男，湖北武汉人，博士生导师，教授，研究方向为信息化. E-mail：47319770@qq. com

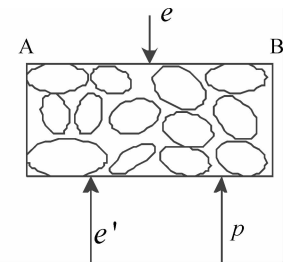


图 1　含水层中的粒间应力和压力

由图 1 可知，在 A、B 两点范围内，含水层中的粒间的应力值和土骨架应力值的和等于含水层中全部重量的总应力值。水的压力 p 和土骨架应力 e' 会随着上覆荷载改变而改变：

$$d^e = d^{e'} + d^p。\tag{2}$$

式中：d^e 表示覆盖层荷载对应的上覆荷载总应力，$d^{e'}$ 表示土骨架上覆荷载应力，d^p 表示水的上覆荷载压力。如果只改变水的压力，不改变总应力 e 时，存在下式：

$$\begin{cases} d^e = 0 = d^{e'} + d^o; \\ d^{e'} = -d^p。 \end{cases}\tag{3}$$

造成地质沉陷的主要原因之一是过渡抽取地下水，导致孔隙水之间的压力减少、水层水平面下降，增加了地基的有效应力[9]。

2　地质沉陷信息整合技术方法

设 n 代表的是矿区中存在的工作面总数；$t_s(k)$ 代表的是第 k 个工作面对应的开采日期；$t_e(k)$ 代表的是第 k 个工作面对应的停采日期；$v(k)$ 代表的是开采速度，整合煤矿深层开采地质沉陷信息的具体步骤如下。

(1)根据拐点在矿区工作面中对应的坐标，对预计范围进行估计，通过网格划分矿区范围[10]。单元格可以通过两种方法进行划分，分别是周期来压步距法和有效分割尺寸法，煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法采用周期来压步距法划分单元格：

$$L = h\sqrt{R_T/3q}。\tag{4}$$

式中：L 代表的是周期来压步距；h 代表的是顶厚度；q 代表的是上覆岩层对应的均布荷载；R_T 代表的是抗拉强度。

(2)针对 k 个工作面，在 t 时刻开始整合地质沉陷信息，则 t 即为开采单元在开采煤矿过程中所用的采动时间，对 t 和 t_s 以及 $t_e(k)$ 之间的关系进行判断。当 $t \leqslant t_s$ 时，表明该工作面中的煤矿没有被开采，进行步骤(7)；当 $t_i(k) < t < t_e(k)$ 时，表明该工作面中的煤矿已经被开采了，当 $v(k) > (t-t_s(k))$ 时，进行下一步；当 $t \geqslant t_e(k)$ 时，表明该工作面中的煤矿已经被开采完毕，进行下一步。

(3)用工作面的坐标代替矿区坐标，在用单元格坐标表示工作面坐标。

$$\begin{aligned} x &= (X + X_0)\cos\alpha + (Y - Y_0)\sin\alpha; \\ y &= -(X - X_0)\sin\alpha + (Y - Y_0)\cos\alpha 。 \end{aligned}\tag{5}$$

式中：x、y 代表的是工作面坐标系中点对应的坐标；X、Y 代表的是在矿区坐标系中工作面坐标系原点对应的坐标。

当 $x \leqslant x_1$ 时，参数 α 的计算公式为：

$$\alpha = \arctan\frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}。\tag{6}$$

当 $x \geqslant x_1$ 时，参数 α 的计算公式为：

$$\alpha = \pi + \arctan\frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}。\tag{7}$$

(4)整合计算所有单元格在工作面中对地质沉陷的影响。沿轴向划分工作面，获得 m 个开采单元，上述 m 个开采单元整合的动态移动变形值即为工作面中地表动态的移动变形[11-12]。假设在开切眼处对应的开采时刻为 0 时刻，t_i 代表的是第 i 个开采单元在开采过程中对应的回采时间；v_i 代表的是第 i 个开采单元对应的回采速度。

设 $\varphi(t)$ 代表的是第 1 个开采单元对应的时间函数；$\varphi(t-\sum_{j=1}^{i} t_j)$ 代表的是第 i 个开采单元对应的时间函数，其表达式分别为：

$$\varphi(t) = 1 - e^{-ct};\tag{8}$$

$$\varphi(t-\sum_{j=1}^{i} t_j) = 1 - e^{-c(t-\sum_{j=1}^{i} t_j)}。\tag{9}$$

式中：j 表示开采单元对应的任务，i 表示开采单元调度任务的上限值，t_j 表示变量 j 个开采单元对应的时间任务量。根据公式(8)和公式(9)的计算结果，获得第 1 个开采单元和第 i 个开采单元导致的动态沉降值：

$$\begin{aligned} W_1(x_1,\ t) &= W^0(x_1)\varphi(t); \\ w_1(x_i,\ t-\sum_{j=1}^{i} t_j) &= W^0(x_i)\varphi(t-\sum_{j=1}^{i} t_j)。 \end{aligned}\tag{10}$$

式中：x_i 代表的是在独立坐标系中开采单元对应的坐标。

半无限开采法计算下沉的公式为：

$$W(x_i) = \frac{W_0}{2}[erf(\frac{\sqrt{\pi}}{r}x_i) + 1]。\tag{11}$$

有限开采计算下沉的公式为：

$$W^0(x_i) = W(x_i) - W(x_i - v_i t_i)。\tag{12}$$

设工作面在煤矿开采过程中的速度保持不变，即 $v_1 = v_2 = \cdots = v_m$ 或 $t_1 = t_2 = \cdots = t_m$，则 $mv_1\ t_1$ 即为工作面对应的走向长度。如果不能整分工作面对应的走向长度时，所有单元格的长度总和即为工作面对应的走向长度[13-14]。

结合上述公式在整合原理的基础上得到地表移动走向主断面中存在的任一点在工作坐标系中对应的下沉值[15]：

$$\begin{aligned} W(x,\ t) &= \varphi(t)[W(x) - W(x - v_1 t_1)] + \sum_{i=1}^{m-1}\varphi(t - it_1) \\ &[W(x - iv_1 t_1) - W(x - (i+1)v_1 t_1)] + W_L(x,\ t)。 \end{aligned}\tag{13}$$

式中：$W_L(x,\ t)$ 代表的是走向主断面地表中存在的任一点对应的动态下沉受不足一个单元部分在工作面坐标系中开采的影响，其计算公式为：

$$W_L(x,\ t)=\varphi(t-mt_1)[W(x-mv_1t_1)-W(x-v_1t_1)]。\quad(14)$$

通过上述过程，获得任意时刻地表任意点在工作面坐标系中对应下沉值：

$$W(x,\ y,\ t)=\varphi(t)W_1(x_1,\ y_1)+\sum_{i=2}^{m-1}\varphi(t-(i-1)t_1);\quad(15)$$

$$W_i(x_i,\ y_i)=\frac{1}{m_0q\cos\alpha}[W(x_i)-W(x_i-v_1t_1)]$$
$$[W(y)-W(y-l)];\quad(16)$$

$$W_L(x,\ y,\ t)=\varphi(t-mt)-[W(x-m_1t_1)-W(x-v_1t)]$$
$$[W(y)-W(y-l)]。\quad(17)$$

式中：$W_i(x_i,\ y_i)$代表的是地表任意点由第 i 个单元格引起的动态下沉值；$W_L(x,\ y,\ t)$代表的是不足一个单元格部分工作面在单元格划分过程中，引起的 t 时刻中任一点对应的下沉值；m_0 代表的是煤层厚度；α 代表的是煤层倾角；q 代表的是下沉系数；l 代表的是工作面倾向的计算长度。

(5)通过以下公式整合计算结果，获得地陷下沉受开采工作面的影响：

$$\Theta(t)=1-Ae^{-c(t-\tau_{op})};\quad(18)$$

$$q(t)=\begin{cases}0,\ t<\tau_{op};\\1,\ t\geqslant\tau_{op}。\end{cases}\quad(19)$$

式中：$\Theta(t)$代表的是主时间函数；A 代表的是地表瞬间下沉和动态下沉在经过时间间隔 τ_{op} 后对应的比值、τ_{op}代表的是地面受到单元开采的时间；c 代表的是时间影响系数。

$k=k+1$，当 $k\leqslant n$ 时，输出地质沉陷信息整合技术值，其中 n 代表的是工作面在矿区的总数。

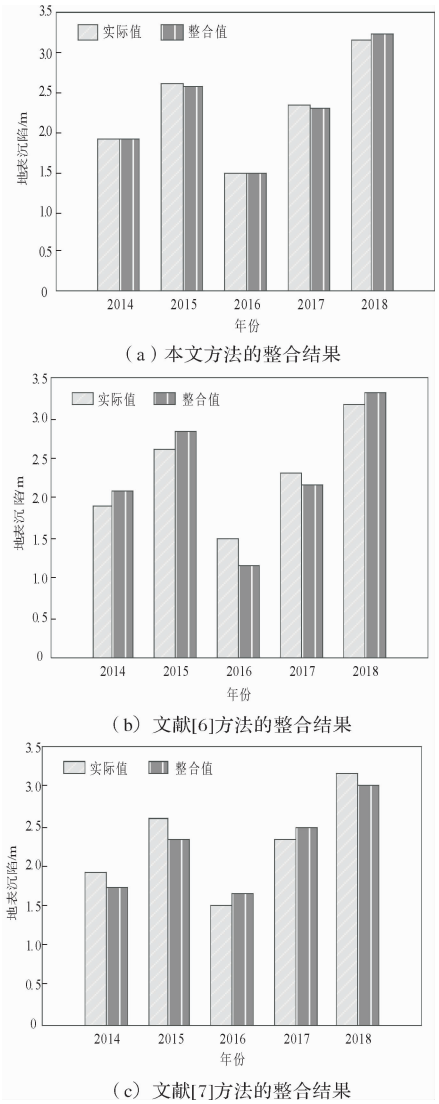
3 实验结果与分析

为了验证煤矿深层开采地质沉陷灾害信息整合技术的整体有效性，在 MyEclipse8.6 软件中对煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术进行测试。分别采用煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法、文献[6]方法和文献[7]方法整合煤矿深层开采地质沉陷信息，并将整合结果与实际结果进行对比，测试结果如图 2 所示。由图 2 可知，煤矿深层开采地质沉降信息整合技术方法的整合结果地表沉陷值与文献[6]方法和文献[7]方法整合结果相比，每一年的整合结果更接近沉陷值。在得到沉降结果的基础上，为进一步验证其整合效果，需利用三种方法进行其整合精度验证。

煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法利用平均绝对百分误差 *MAPE* 对煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法、文献[6]方法和文献[7]方法的整合精度进行度量，平均绝对百分误差 *MAPE* 的计算公式如下：

$$MAPE=\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{m}\Delta t\times100\%。\quad(20)$$

式中：t 表示煤矿深层开采地质沉降信息任务数，m 表示地质沉降信息调度任务的上限值，Δt 表示变量 t 个任务被分配到任务节点的数量。平均绝对百分误差 *MAPE* 越低，表明整合精度越高，煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法、文献[6]方法和文献[7]方法的平均绝对百分误差 *MAPE* 如图 3 所示。



(a) 本文方法的整合结果

(b) 文献[6]方法的整合结果

(c) 文献[7]方法的整合结果

图 2 三种方法的整合结果

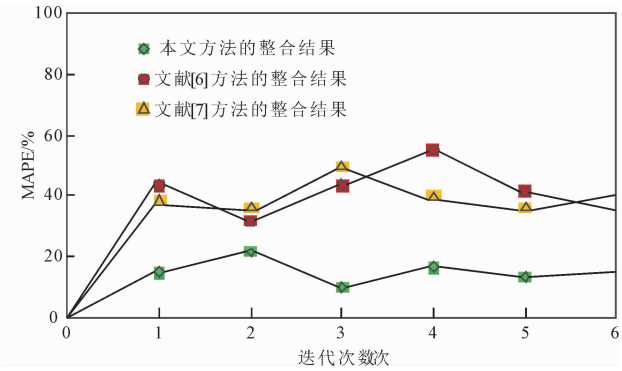


图 3 三种方法的绝对百分误差对比结果

由图 3 可知，煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法的平均绝对百分误差在多次迭代中均小于文献[6]方法和文献[7]方法的平均绝对百分误差，其原因是煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法

在整合煤矿深层开采地质沉陷信息之前分析了地质沉陷的机理，为整合提供了相关信息。综上所述，本研究给出的信息整合技术提高了煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法的整合精度。

4　结束语

我国对煤矿资源的需求随着经济的发展不断加大，促进了煤矿深层的开采，导致开采地质沉陷。对地质沉陷信息进行整合，可以有效的避免地质沉陷。当前地质沉陷信息整合方法存在整合精度低的问题，提出煤矿深层开采地质沉陷信息整合技术方法，对地质沉陷机理进行分析，根据分析获取的信息实现煤矿深层开采地质沉陷信息的整合，解决了当前方法中存在的问题，实验研究表明，本文方法整合结果更接近地表沉降值，其整合绝对百分误差值较小，精度更准确，为煤矿开采技术的发展奠定了基础。

参考文献

[1] 韦延兰，李文莉，周立新，等．岩溶水文地质环境地质信息管理系统构建与实现[J]．中国岩溶，2018，37(1)：146-153.

[2] 罗小杰，罗程．覆盖型岩溶地面塌陷综合地质预测与危险性评估[J]．中国岩溶，2016，35(1)：51-59.

[3] 郭庆彪，郭广礼，吕鑫，等．山区谷底沉陷预测模型及其参数反演[J]．岩土力学，2016，37(5)：1351-1356.

[4] 马丽，段中会，秦永军，等．煤矿开采地质信息约束下的地震精细解释[J]．煤炭技术，2018，37(6)：245-232.

[5] 杨果岳，方明，孙希望，等．基于递归图理论的沉降时间序列可预测分析[J]．水文地质工程地质，2018，45(1)：158-164.

[6] 麻凤海，赵阳豪．地铁盾构施工引起的地表沉降预测[J]．地震研究，2016，39(1)：10-14.

[7] 严皓，李宾，李久．基于地震属性的中深层薄砂层厚度定量预测——以渤海 A 油田为例[J]．地球物理学进展，2019，34(01)：407-411.

[8] 胡振琪，龙精华，张瑞娅，等．中国东北多煤层老矿区采煤沉陷地损毁特征与复垦规划[J]．农业工程学报，2017，33(5)：238-247.

[9] 高冠杰，侯恩科，谢晓深，等．基于四旋翼无人机的宁夏羊场湾煤矿采煤沉陷量监测[J]．地质通报，2018，37(12)：144-149.

[10] 贾艳昌，谢谟文，昌圣翔，等．基于概率积分法和自四归模型的开采沉陷算法[J]．科学技术与工程，2017，17(7)：148-152.

[11] 王曦，付梅臣，储佩佩，等．唐山市南湖采煤沉陷区地价空间规律研究[J]．中国矿业，2017，26(1)：135-140.

[12] 丁峰，胡光义，尹成，等．基于地质信息约束的概率神经网络地震反射模式预测方法[J]．中国海上油气，2018，30(1)：127-131.

[13] 刘德元，孙新华，何盛东，等．大红山矿区开采沉陷预计的 MapGIS 方法[J]．金属矿山，2016，45(9)：157-160.

[14] 赵忠明，施天威，董伟，等．灰色关联分析与 BP 神经网络的概率积分法参数预测[J]．测绘科学，2017，42(7)：40-44，55.

[15] 张兵，崔希民．开采沉陷动态预计的分段 Knothe 时间函数模型优化[J]．岩土力学，2017，38(2)：541-548.

Information Integration Technology of Geological Subsidence Disaster in Deep Mining

ZHENG Haishan[1,2] and ZHOU Jian[3]

(1. *Shanxi University*, *Taiyuan* 030006, *China*;
2. *Yangquan Coal Industry (Group) Co.*, *LTD*, *Yangquan* 045000, *China*;
3. *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: When the current method is used to integrate the geological subsidence information of deep mining in coal mine, the error between the integrated geological subsidence value and the actual geological subsidence value is large, and there is a problem of low integration accuracy. Therefore, the information integration technology method of deep mining geological subsidence is put forward, firstly, the paper analyzes the geological subsidence mechanism of deep mining, and according to the obtained information, divides the deep mining face along the strike to obtain multiple mining units. On this basis, the integration of geological subsidence information in deep mining is realized by integrating the dynamic movement deformation value of the unit. The experimental results show that the integrated geological subsidence value of the proposed method is basically consistent with the actual geological subsidence value, and the integrated absolute percent error value is small, which improves the integration accuracy of the deep mining geological subsidence information integration technology.

Key words: deep mining in coal mine; geological subsidence; information integration; integration unit