



## 典型采煤沉陷区采空塌陷场地稳定性评价

张 静, 朱 巍, 崔 健, 孙家全, 代雅建

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

**摘 要:** 采空塌陷场地稳定性评价是后续开展工程建设的重要依据。首先采用概率积分法计算采空区地表剩余移动变形值, 包括剩余倾斜值、剩余曲率值、剩余水平变形值, 然后定性与定量相结合, 建立了采煤沉陷速率、累计沉陷量、地表剩余移动变形、采深采厚比、地面塌陷及地裂缝宏观稳定性等场地稳定性评价指标体系。本研究以沈阳市某采煤沉陷区为例开展场地稳定性评价。结果表明, 不稳定区分布在研究区西部, 面积约为 1.64 km<sup>2</sup>, 占全区面积的 5.13%。区内采深采厚比大于等于 60, 当前地表沉陷速率较高 ( $\geq 60$  mm/a), 剩余地表移动变形值较大, 地面塌陷、地裂缝较发育且仍在发展。基本稳定区主要位于研究区东部, 面积为 2.34 km<sup>2</sup>, 约占总面积的 7.32%。区内采空区深厚比介于 35~60, 地表沉陷速率为 30~60 mm/a, 剩余变形移动值中等, 地面塌陷、地裂缝已基本稳定。

**关键词:** 概率积分法; 地表移动变形; 地面塌陷; 场地稳定性; 沉陷速率; 地质灾害

## Stability evaluation of goaf collapse sites in typical coal mining subsidence areas

ZHANG Jing, ZHU Wei, CUI Jian, SUN Jia-quan, DAI Ya-jian

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

**Abstract:** The stability evaluation of goaf collapse sites serves as a crucial basis for subsequent engineering construction. The study first adopts the probability integration method to calculate the surface residual movement and deformation values in goaf areas, including residual tilt value, residual curvature and residual horizontal deformation value, and then establishes the site stability evaluation index system by integrating qualitative and quantitative approaches, incorporating factors such as coal mining subsidence rate, cumulative subsidence, surface residual movement and deformation, mining depth-to-thickness ratio, and macroscopic stability of ground collapses and ground fissures. Taking a coal mining subsidence area in Shenyang City as an example for site stability evaluation, the results show that the unstable zone is located in the western part of the study area, covering approximately 1.64 km<sup>2</sup>, accounting for 5.13% of the total area. In this zone, the mining depth-to-thickness ratio is greater than or equal to 60, with relatively high current surface subsidence rate ( $\geq 60$  mm/a) and large residual surface movement and deformation

收稿日期: 2024-01-04; 修回日期: 2024-03-17. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“沈阳市地质安全体检与风险评估示范”(DD20230542).

作者简介: 张静(1982—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事城市地质安全研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail// maius1222@163.com

通信作者: 朱巍(1979—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事国土空间综合调查研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail// zhuwei\_1114@163.com

引用格式: 张静, 朱巍, 崔健, 孙家全, 代雅建. 典型采煤沉陷区采空塌陷场地稳定性评价[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 380-387.

Zhang J, Zhu W, Cui J, Sun J Q, Dai Y J. Stability evaluation of goaf collapse sites in typical coal mining subsidence areas [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 380-387.

values, and the ground collapses and fissures are well-developed and still evolving. The basically stable zone is primarily situated in the eastern part, with an area of 2.34 km<sup>2</sup>, representing about 7.32% of the total area. The mining depth-to-thickness ratio is 35–60, with the surface subsidence rate of 30–60 mm/a and moderate residual movement and deformation values. The ground collapse and fissure have largely stabilized.

**Key words:** probability integration; surface movement and deformation; ground collapse; site stability; subsidence rate; geological hazard

## 0 前言

地下煤矿资源的开采形成大面积采空区,导致上覆岩体冒落、断裂和弯曲,地面形成塌(沉)陷、地裂缝等地质灾害。随着城市化发展,土地资源需求日益增大,采空塌陷场地的再利用是缓解土地资源紧张的主要途径之一。在采空塌陷区开展城镇建设、地下空间开发,以及光伏电站<sup>[1]</sup>、高速公路、铁路等重大工程建设前必须开展场地稳定性评价,以保证工程安全实施。目前采空塌陷稳定性评价方法主要包括工程地质类比法、地表移动变形判别法、极限平衡分析法和数值模拟法等<sup>[2-6]</sup>。工程地质类比法适用于各种类型采空塌陷稳定性定性评价;地表移动变形判别法适用于充分采动条件下采空塌陷场地稳定性定量评价;极限平衡法适宜于穿巷、房柱及单一巷道等类型以及条带式开采所形成的采空塌陷场地稳定性定量评价;数值模拟法适宜于正规开采条件下的采空塌陷,可采用有限单元法、有限差分法、离散元法、边界元法,作为一种比较和参考性方法。另外,还有很多学者采用模糊数学、可拓学、神经网络、概率积分法、数值模拟等方法对采空区稳定性进行评价<sup>[7-11]</sup>。本研究在概率积分法计算地表剩余移动变形参数的基础上,综合考虑采煤沉陷速率、累计沉陷量、采深采厚比、地面塌陷及地裂缝宏观稳定性等因素,建立采空塌陷场地稳定性评价指标体系,并以沈阳市某典型采煤沉陷区为例开展场地稳定性评价,为沈阳市重大工程建设、地下空间开发利用、国土空间规划等提供科学依据<sup>[12-13]</sup>。

## 1 采煤沉陷区地表移动变形评估

地表移动与变形计算是矿山开采沉陷及其控制的核心内容之一,通常用于开采之前的地表移动与变形预计,或对于已经形成的采矿沉陷区计算其剩余变形量。我国学者广泛应用的地表移动与变形计算的方法包括典型曲线法、负指数函数法、概率积分法等<sup>[14]</sup>。

### 1.1 概率积分法的原理

20世纪50年代,波兰学者李特威尼申(J. Litwiniszyn)将自然岩体抽象为非连续介质中的颗粒体介质,提出并建立了岩层移动的随机介质理论<sup>[15]</sup>。60年代初期,我国学者刘宝琛等将随机介质理论引入国内,并逐渐发展为概率积分法。概率积分法是将矿山岩层移动作为一个服从统计规律的随机现象,通过随机介质理论导出单元开采引起的单元地表下沉和水平移动表达式,通过对开采区域求积分得到地下开采引起的地表移动与变形值<sup>[16]</sup>。因为研究区煤层为倾斜煤层,在此详细介绍开采倾斜煤层时采用概率积分法进行采空区地表移动变形值预计的方法。采空区倾斜主断面地表移动变形包括下沉值、倾斜值、曲率、水平移动、水平变形等5个参数,其计算公式如下。

地表下沉值:地表点移动向量的垂直分量。

$$\begin{aligned} W_{(y)}^0 &= \frac{W_{\max}}{\sqrt{\pi}} \left[ \int_{-\sqrt{\pi} \frac{y}{r_1}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda - \int_{-\sqrt{\pi} \frac{y-l_2}{r_2}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \right] \\ &= \frac{W_{\max}}{2} \left\{ \left[ \operatorname{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{y}{r_1} \right) + 1 \right] - \left[ \operatorname{erf} \left( \sqrt{\pi} \frac{y-l_2}{r_2} \right) + 1 \right] \right\} \\ &= W_{(y)} - W_{(y-L)} \end{aligned} \quad (1)$$

地表倾斜值:地表两相邻点下沉值之差与其水平变形前的水平距离之比。

$$\begin{aligned} i_{(y)}^0 &= \frac{dW_{(y)}^0}{dy} = W_{\max} \left[ \frac{1}{r_1} e^{-\pi \left( \frac{y}{r_1} \right)^2} - \frac{1}{r_2} e^{-\pi \left( \frac{y-l_2}{r_2} \right)^2} \right] \\ &= i_{(y)} - i_{(y-L)} \end{aligned} \quad (2)$$

地表曲率:地表两相邻线段倾斜差与其变形前的水平距离平均值之比。

$$\begin{aligned} K_{(y)}^0 &= \frac{di_{(y)}^0}{dy} = -2\pi W_{\max} \left[ \frac{y}{r_1^2} e^{-\pi \left( \frac{y}{r_1} \right)^2} - \frac{y-l_2}{r_2^2} e^{-\pi \left( \frac{y-l_2}{r_2} \right)^2} \right] \\ &= K_{(y)} - K_{(y-L)} \end{aligned} \quad (3)$$

地表水平移动值:地表点移动向量的水平分量。

$$U_{(y)}^0 = b W_{\max} \left[ e^{-\pi \left( \frac{y}{r_1} \right)^2} - e^{-\pi \left( \frac{y-l_2}{r_2} \right)^2} \right]$$

$$+ \frac{W_{\max}}{\sqrt{\pi}} \cot \theta \left[ \int_{-\sqrt{\pi} \frac{y}{r_1}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda - \int_{-\sqrt{\pi} \frac{y-l_2}{r_2}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \right]$$
$$= U_{(y)} - U_{(y-L)} + W_{(y)} \cot \theta \tag{4}$$

地表水平变形值：地表两相邻点的水平移动值之差与其变形前的水平距离之比。

$$\varepsilon_{(y)}^0 = \frac{dU_{(y)}^0}{dy} = -2\pi b W_{\max} \left[ \frac{y}{r_1^2} e^{-\pi(\frac{y}{r_1})^2} - \frac{y-l_2}{r_2^2} e^{-\pi(\frac{y-l_2}{r_2})^2} \right]$$
$$+ W_{\max} \cot \theta \left[ \frac{1}{r_1} e^{-\pi(\frac{y}{r_1})^2} - \frac{1}{r_2} e^{-\pi(\frac{y-l_2}{r_2})^2} \right]$$
$$= \varepsilon_{(y)} - \varepsilon_{(y-L)} + i_{(y)}^0 \cot \theta \tag{5}$$

式中： $W_{(y)}^0$ —地表下沉值(m)； $i_{(y)}^0$ —地表倾斜值(m/m)； $K_{(y)}^0$ —地表曲率( $10^{-3}/m$ )； $U_{(y)}^0$ —地表水平移动值(m)； $\varepsilon_{(y)}^0$ —地表水平变形值(m/m)； $W_{\max}$ —地表最大下沉值(m)； $r_1$ 、 $r_2$ —上下山主要影响半径(m)； $L$ —采区倾向计算长度(m)； $l$ —采区走向计算长度(m)； $b$ —水平移动系数(无量纲)； $\theta$ —开采影响传播角( $^{\circ}$ )。

对于多个工作面，首先计算出单个工作面开采引起地表预计点的下沉，然后根据叠加原理进行叠加计算获得多工作面开采的联合影响。

采空区剩余地面变形阶段的地表移动随时间增加会表现出影响半径扩大、移动盆地更加平缓的特征，因此，剩余地表移动变形的计算参数也应进行调整。相关研究表明，剩余变形阶段的水平移动系数基本不变，下沉系数及主要影响角与时间呈负指数函数关系<sup>[6]</sup>。下沉系数 $q$ 的计算公式为：

$$q = ae^{-bt} \tag{6}$$

其中， $a = -0.1195 \times \frac{H}{D_m} + 0.4192$ ， $b = 0.0286 \ln \left( \frac{H}{D} \right) + 0.0395$ ， $t$ —距开采结束时间(a)， $D$ —工作面宽度(m)； $H$ —采深(m)； $m$ —煤层厚度(m)，主要影响角( $\beta$ )正切的计算公式为：

$$\tan \beta = a' e^{-b't} \tag{7}$$

$$a' = 2.5376 \times \frac{D_m}{H} - 0.6766 \tag{8}$$

$$b' = 0.0151 \times \frac{D_m}{H} - 0.0018 \tag{9}$$

1.2 计算参数的确定

《采空塌陷勘查规范(试行)(T/CAGHP005—2018)》和《煤矿采空区岩土工程勘察规范(GB 51044—2017)》规定：“当采用长壁式开采时，采空区地表移动预计宜采用概率积分法进行计算”。研究区内煤矿均以走向

长壁式采矿方式为主，因此可以采用概率积分法计算地表移动变形。由于目前清水煤矿已经闭坑约6年，蒲河煤矿共10个采区，现南一采区、北一采区、北三采区、北五采区已停采，北六、南二采区部分采动，正在开采南二采区，采煤引起的潜在地表变形已然形成，但缺乏全区地表形变监测资料，因此采用规范推荐的概率积分法计算区内地表剩余变形进行预计，为场地稳定性评价提供依据。

根据《煤矿采空区岩土工程勘察规范》，地表移动的延续时间 $T$ (d)可按下列公式确定：

$$\text{当 } H_0 \leq 400 \text{ m 时, } T = 2.5H_0 \tag{10}$$

$$\text{当 } H_0 > 400 \text{ m 时, } T = 1000 \exp \left( 1 - \frac{400}{H_0} \right) \tag{11}$$

其中 $H_0$ 为开采深度。

南二采区开采深度一般为379~385 m，地表移动的延续时间( $T$ )大约947~963 d；西一采区开采深度一般为455~506 m，地表移动的延续时间( $T$ )大约1 129~1 233 d。

按《采空塌陷勘查规范(试行)》中经验公式计算剩余下沉系数 $q'$ ：

$$q' = (1 - \eta)q \tag{12}$$

其中， $q$ —下沉系数， $q'$ —剩余下沉系数， $\eta$ —削减系数。不同时间的削减系数取值见表1。

表 1 不同时间的削减系数参考值  
Table 1 Reference values of reduction coefficient at different times

| 开采结束时间/a       | 1    | 2     | 5   | 10    | 20    | >20  |
|----------------|------|-------|-----|-------|-------|------|
| 削减系数( $\eta$ ) | 0.75 | 0.825 | 0.9 | 0.938 | 0.975 | 0.99 |

采空区上覆岩体主要为泥岩、砂岩、粉砂岩，饱和单轴抗压强度为2.81~14.11 MPa，属极软岩—软岩。根据《煤矿采空区岩土工程勘察规范》，以较为保守的最大下沉的原则，按覆岩岩性确定地表移动参数(表2)，计算采空区地表剩余变形量。

2 煤矿采空区场地稳定性评价方法

2.1 评价指标选取

本研究评价区域位于沈阳市沈北新区(图1)，场地稳定性主要受到开采方式、终采时间、采深采厚比、松散层厚度、顶板岩性、地表变形特征等因素影

表 2 地表沉陷计算参数  
Table 2 Calculation parameters of surface subsidence

| 采区       | 工作面<br>编号 | 停采<br>时间 | 下沉系<br>数(q) | 削减系<br>数(η) | 剩余下沉<br>系数(q') | 水平移动<br>系数(b) | 主要影响<br>角正切<br>(tanθ) |
|----------|-----------|----------|-------------|-------------|----------------|---------------|-----------------------|
| 南二<br>采区 | 1#        |          | 0.86        | 0           | 0.86           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 2#        | 2021-11  | 0.86        | 0.75        | 0.22           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 13#       | 2020-12  | 0.86        | 0.825       | 0.15           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 15#       | 2021-12  | 0.86        | 0.75        | 0.22           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 12#       | 2019-06  | 0.86        | 0.862       | 0.12           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 14#       | 2016-09  | 0.86        | 0.910       | 0.08           | 0.25          | 2.5                   |
| 西一<br>采区 | 10#       | 2018-02  | 0.86        | 0.9         | 0.09           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 2#        | 2013-06  | 0.86        | 0.934       | 0.06           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 1#        | 2011-10  | 0.86        | 0.942       | 0.05           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 11#       | 2017-03  | 0.86        | 0.922       | 0.07           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 7#        | 2015-06  | 0.86        | 0.919       | 0.07           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 3#        | 2014-02  | 0.86        | 0.930       | 0.06           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 5#        | 2018-10  | 0.86        | 0.875       | 0.11           | 0.25          | 2.5                   |
|          | 6#        | 2020-03  | 0.86        | 0.844       | 0.13           | 0.25          | 2.5                   |

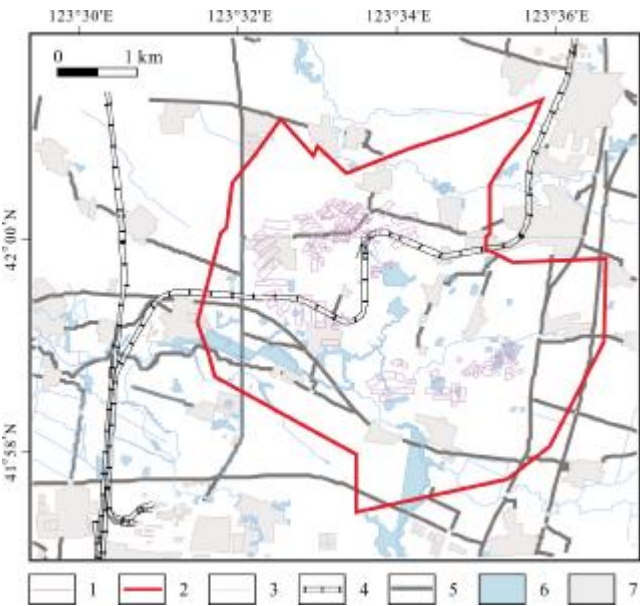


图 1 评价区平面位置图

Fig. 1 Location map of the evaluation area

1—采空区 (goaf); 2—评价区范围 (evaluation area); 3—河流 (river);  
4—铁路 (railway); 5—公路 (road); 6—水系区域 (water system); 7—居  
民区 (residential area)

响<sup>[17-18]</sup>, 考虑到研究区内现有的煤矿开采、地质条件、地表变形等,选取采煤沉陷速率、累计沉陷量、地表剩余移动变形、采深采厚比、地面塌陷、地裂缝宏观稳定性等作为场地稳定性评价指标, 定性定量相结合, 其中采煤沉陷速率、累计沉陷量利用 2017—2021 年 InSAR 监测技术获取; 采用概率积分法计算得到地表剩余移动变形参数; 收集矿区井上下对照图计算采深采厚比; 通过现场调查地面塌陷、地裂缝发育程度及发展趋势, 判断其宏观稳定性。

2.2 评价分区标准

评价指标的分级是否科学直接决定了评价分区结果的可靠性, 本研究参考了相关的规范、标准和技术要求, 将各评价指标分为不稳定、基本稳定、稳定 3 个等级。

2.2.1 地表沉陷速率

根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》: 一般条件下当地表下沉值达到 10 mm 时, 即认为地表开始移动; 6 个月内地表下沉的累计值不超过 30 mm 时, 即认为移动稳定。连续 3 个月下沉值不超过 15 mm, 为基本稳定阶段, 此外均认为地表移动为不稳定阶段。因此, 地表沉陷速率大于 60 mm/a 为不稳定, 地表沉陷速率大于 30 mm/a、小于 60 mm/a 为基本稳定, 地表沉陷速率小于 30 mm/a 为稳定。

2.2.2 累计沉陷量

在现行的《特大城市地面沉降风险评估与区划技术要求(试行)》中, 有监测记录以来的累计沉降量大于 800 mm 的为地面沉降发育程度强, 300~800 mm 的为发育程度中等, 小于 300 mm 的为发育程度弱区。研究区无历史监测记录, 采用的数据为近 5 年的数据, 因此结合 InSAR 监测数据结果, 将 5 年累计沉降量大于 300 mm 的设定为不稳定区, 150~300 mm 的为基本稳定区, 小于 150 mm 的为稳定区。

2.2.3 地表剩余移动变形

据《煤矿采空区岩土工程勘察规范》(GB 51044—2017), 地表移动变形判别法可用于顶板垮落充分、规则开采的采空区场地的稳定性定量评价。研究区内采空区规则开采, 顶板垮落充分, 因此可以采用地表移动变形判别法进行稳定性评价, 评价参数按表 3 综合判别。

表 3 按地表剩余移动变形值确定的场地稳定性等级

Table 3 Site stability grade by surface residual movement and deformation values

| 稳定状态 | 下沉速度 $V_w/(mm/d)$ 及下沉值/mm   | 地表剩余移动变形值               |                              |                                  |
|------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------------|
|      |                             | 剩余倾斜值 $\Delta i/(mm/m)$ | 剩余曲率值 $\Delta K/(10^{-3}/m)$ | 剩余水平变形值 $\Delta \epsilon/(mm/m)$ |
| 稳定   | $V_w<1.0$ , 半年下沉值 $<30$     | $\Delta i<3$            | $\Delta K<0.2$               | $\Delta \epsilon<2$              |
| 基本稳定 | $V_w<1.0$ , 半年下沉值 $\geq 30$ | $3\leq \Delta i<10$     | $0.2\leq \Delta K<0.6$       | $2\leq \Delta \epsilon<6$        |
| 不稳定  | $V_w\geq 1.0$               | $\Delta i\geq 10$       | $\Delta K\geq 0.6$           | $\Delta \epsilon\geq 6$          |

2.2.4 采深采厚比

矿层埋深越大(即开采深度越大),变形发展到地表所需的时间越长,地表变形值越小,变形比较平缓均匀,但地表移动盆地的范围增大。矿层厚度大,采空的空间大,会促使地表的变形值增大。根据《煤矿环境地质灾害与防治》,可用深厚比来概括评价塌陷程度。当深厚比小于 20 时,有可能产生极严重的塌陷破坏,地表将出现规模大、范围广的裂缝或塌陷等地表变形;深厚比在 20~200 时,地表产生不同程度的变形;深厚比大于 200 时,地表变形一般很轻,有可能出现微小裂缝。根据煤矿目前采用的通用标准,在煤层深厚比小于 30 时所造成的地表建筑损毁程度严重,深厚比 30~60 时中等,深厚比 60~200 时为轻度,深厚比小于 200 时极轻微度。因此本研究评价标准为:深厚比小于 35 时危险性高,深厚比 35~60 时危险性中等,深厚比大于等于 60 时危险性低。

2.2.5 地面塌陷及地裂缝宏观稳定性

对研究区进行现场调查访问发现,有些区域地面塌(沉)陷、地裂缝仍在不断发生,居民房屋裂缝仍在扩展,因地面塌陷形成的积水坑或积水洼地仍在扩大。这些区域定性判断为不稳定区,在采空区以外的区域判定为稳定区,不稳定区和稳定区之间的区域为基本稳定区。

2.2.6 场地稳定性综合评价分区标准

对各单项评价指标进行评价分区后,以保证最安全为原则进行场地稳定性综合评价。5 项指标中如有 1 项评价为不稳定,则综合评价结果为不稳定;5 项指标均评价为稳定,则综合评价结果为稳定;除了不稳定区和稳定区外,其他区域均为基本稳定区(表 4)。

3 场地稳定性评价结果

3.1 单因素评价分析

采用 SBAS-InSAR 技术获取了研究区 2017—2021 年地表形变速率及累计沉陷量,结果表明,区内存在两个地表沉陷集中区(图 2a、b),其中最大的一个在崔公堡村,沉陷速率大于 60 mm/a 的面积达到 0.87 km<sup>2</sup>,累计沉陷量大于 300 mm 的面积为 0.37 km<sup>2</sup>;另外一个位于大望村,沉陷速率大于 60 mm/a 的面积达到 0.16 km<sup>2</sup>,由于 InSAR 解译效果不理想,累计沉陷量图中空白值太多,大望村未解译出累计沉陷量大于 300 mm 的区。

区内煤层赋存于古近系渐新统大桥段(E<sub>3</sub><sup>2</sup>),从上而下分为甲<sub>1</sub>煤、甲<sub>2-1</sub>煤、甲<sub>2</sub>煤、乙组煤,煤层一般厚 3~16 m。根据矿区井上下对照图,开采深度一般为 327.7~570.9 m,采厚 8~23.77 m,采深采厚比为 19.8~57.1。区内西部大部分采空区深厚比大于 60,东部的采空区深厚比均介于 35~60 之间(图 2c)。

根据概率积分法计算结果,评价场地仍剩余相当部分变形量。预测剩余最大变形位于大望村,其中地表剩余最大下沉值为 1 736 mm,剩余最大倾斜值为 18 mm/m(图 2d),剩余最大曲率值 0.54 mm/m<sup>2</sup>(图 2e),剩余最大水平移动值为 637 mm,剩余最大水平变形值为 18 mm/m(图 2f)。根据评价标准,剩余倾斜值和剩余水平变形值判定为不稳定的区域面积分别为 0.04 km<sup>2</sup>和 0.03 km<sup>2</sup>,基本判断仍然处于变形较为活跃阶段,西北部崔公堡剩余变形相对较弱。

研究区从 20 世纪 50 年代开始陆续井工开采煤炭资源,至今形成地下采空区面积达 5.68 km<sup>2</sup>,沉陷区面积 8.23 km<sup>2</sup>,最大下沉值达到 16.99 m。因地面塌陷形成 21

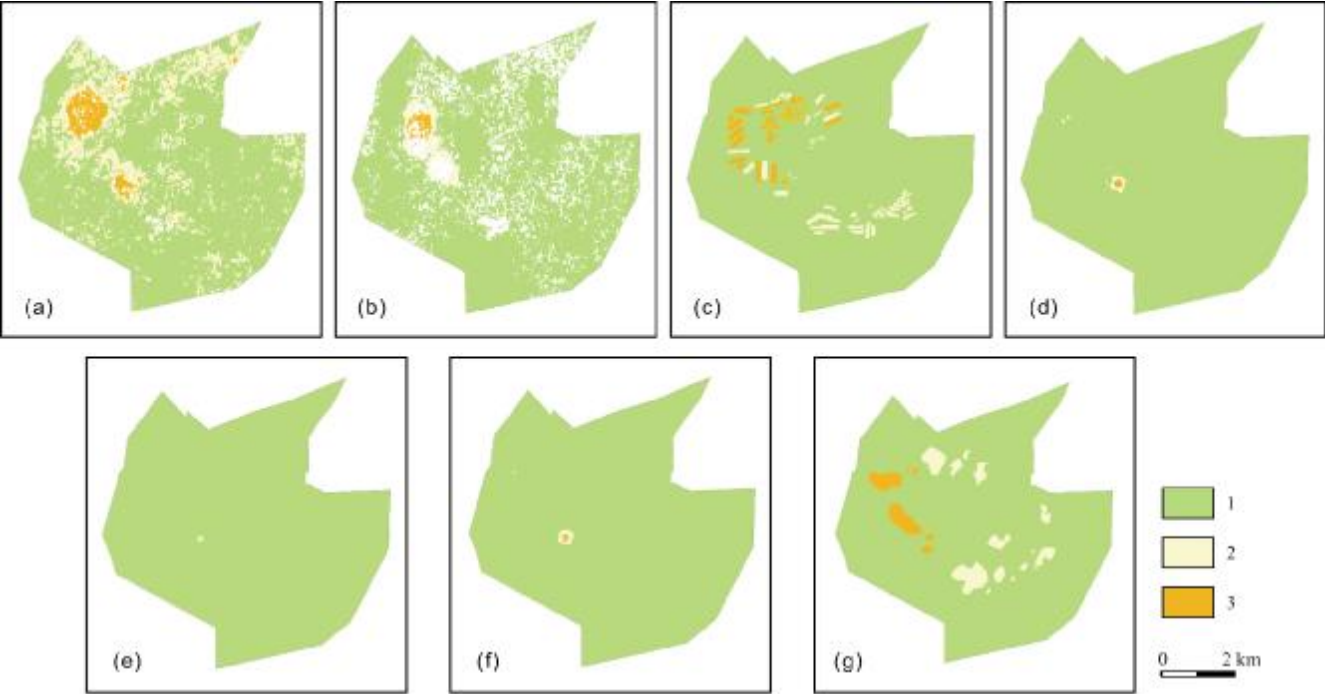


图 2 场地稳定性评价单因素分级图

Fig. 2 Grading maps for single factors of site stability evaluation

a—沉陷速率(subsidence rate); b—累计沉陷量(cumulative subsidence); c—采深采厚比(depth-to-thickness ratio); d—剩余倾斜值(residual tilt value); e—剩余曲率值(residual curvature); f—剩余水平变形(residual horizontal deformation); g—地面塌陷、地裂缝宏观稳定性(macroscopic stability of ground collapse and fissure); 1—稳定(stable); 2—基本稳定(basically stable); 3—不稳定(unstable)

表 4 场地稳定性评价分区标准

Table 4 Zoning standards of site stability evaluation

| 影响因素          | 不稳定区(Ⅰ)                                                          | 基本稳定区(Ⅱ)                                                                       | 稳定区(Ⅲ)                                                 |
|---------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 地表沉陷速率/(mm/a) | ≥60                                                              | 30~60                                                                          | <30                                                    |
| 累计沉陷量/mm      | ≥300                                                             | 150~300                                                                        | <150                                                   |
| 地表剩余移动变形      | $\Delta i \geq 10, \Delta K \geq 0.6, \Delta \varepsilon \geq 6$ | $3 \leq \Delta i < 10, 0.2 \leq \Delta K < 0.6, 2 \leq \Delta \varepsilon < 6$ | $\Delta i < 3, \Delta K < 0.2, \Delta \varepsilon < 2$ |
| 采深采厚比         | <35                                                              | 35~60                                                                          | ≥60                                                    |
| 地面塌陷、地裂缝宏观稳定性 | 不稳定                                                              | 基本稳定                                                                           | 稳定                                                     |
| 因素间逻辑         | 或(∪)                                                             | 非Ⅰ、Ⅲ区                                                                          | 与(∩)                                                   |

处积水坑或积水洼地,水深一般在 2~4 m,最深达 10 m,水面面积达 0.949 km<sup>2</sup>. 2022 年大望村出现北东向羽状地裂缝,最大的一条长 50 m,深 0.5 m,宽 0.1 m. 根据地面塌陷、地裂缝出现的时间、水面是否扩大、居民房屋裂缝扩展趋势等现场调查及访问情况,对地面塌陷、地裂缝的宏观稳定性进行了定性判断,结果见图 2 g.

3.2 场地稳定性综合评价结果

根据上述分区标准和基础资料,利用 ArcGIS 软件的空间分析功能<sup>[19-21]</sup>计算划分出蒲河-清水采煤沉陷区场地稳定区、基本稳定区和不稳定区(图 3). 区内大部分场地为稳定区域,但仍存在相当数量的不稳定区,各级稳定性区域分布特征分述如下.

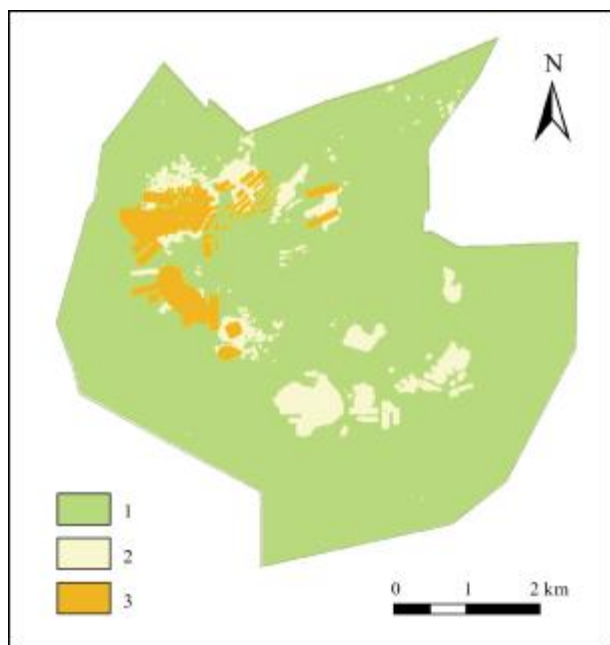


图3 蒲河—清水采煤沉陷区场地稳定性分区图

Fig. 3 Site stability zoning map of Puhe-Qingshui coal mining subsidence area

1—稳定(stable); 2—基本稳定(basically stable); 3—不稳定(unstable)

### 3.2.1 场地不稳定区

该区为当前仍不稳定的区域,主要分布在区内西部,面积约为 1.64 km<sup>2</sup>,占全区面积的 5.13%。区内采深采厚比大于或等于 60,当前地表沉陷速率仍较高( $\geq 60$  mm/a),剩余地表移动变形值较大,采煤沉陷严重,且大中型塌陷坑集中分布于此,对区内房屋稳定性不利,会造成区内房屋开裂、中高层建筑明显倾斜和不均匀沉陷,产生较大内力不协调,对建筑的结构承载力极限状态产生威胁。因此该区不适宜进行房屋建设。

### 3.2.2 场地基本稳定区

该区为场地基本稳定的区域,又称欠稳定区域,是介于稳定和不稳定之间的临界状态,主要分布于区内东部,面积为 2.34 km<sup>2</sup>,约占总面积的 7.32%。区内采空区深厚比介于 35~60,剩余变形移动值中等,造成范围较大、深度较小的区域沉陷,且区内分布有多处小型塌陷以及零星中型塌陷。当前地表平均沉陷速率可达 30~60 mm/a,会使区内建筑产生裂缝及整体沉陷,对建筑的正常使用极限状态产生威胁,但不至于威胁建筑整体承载极限。一级建筑不适建于此,较适宜建低矮平房和临时厂房。

### 3.2.3 场地稳定区

该区为已达到稳定的区域,面积共 27.94 km<sup>2</sup>,约占总面积的 87.37%。区内地质条件较好,煤炭开采量少,历史上不受采煤影响或影响已经不再持续传递,基本无塌陷坑分布,地表沉陷量小一无,当前地表变形速率小于 30 mm/a。

## 4 结论

1)综合考虑研究区内现有的煤矿开采、地质条件、地表变形等因素,结合概率积分法计算得到的剩余倾斜值、剩余曲率值、剩余水平变形值等地表剩余移动变形参数,建立了采煤沉陷速率、累计沉陷量、地表剩余移动变形、采深采厚比、地面塌陷及地裂缝宏观稳定性等场地稳定性评价指标体系,定性与定量相结合。

2)概率积分法计算结果表明,评价场地仍剩余相当部分变形量。预测剩余最大变形位于大望村,其中地表剩余最大下沉值为 1 736 mm,剩余最大倾斜值为 18 mm/m,剩余最大曲率值 0.54 mm/m<sup>2</sup>,剩余最大水平移动值为 637 mm,剩余最大水平变形值为 18 mm/m。

3)不稳定区分布在研究区西部,面积约为 1.64 km<sup>2</sup>,占全区面积的 5.13%。区内采深采厚比大于或等于 60,当前地表沉陷速率较高( $\geq 60$  mm/a),剩余地表移动变形值较大,地面塌陷、地裂缝较发育且仍在发展。研究区东部处于基本稳定状态,面积为 2.34 km<sup>2</sup>,约占总面积的 7.32%。区内采空区深厚比介于 35~60,地表沉陷速率为 30~60 mm/a,剩余变形移动值中等,地面塌陷、地裂缝已基本稳定。

## 参考文献(Reference):

- [1]刘义新,张俊英,贾新果.采煤沉陷区建光伏电站采空区地基稳定性评估[C]//第三届煤炭科技创新高峰论坛——煤炭绿色开发与清洁利用技术与装备论文集.北京:中国煤炭工业协会,2016:220-224.  
Liu Y X, Zhang J Y, Jia X G. Evaluation on goaf foundation stability of photovoltaic plant in mining subsidence area [C]//The 3rd Coal Science and Technology Innovation Summit Forum: Coal Green Development and Clean Utilization Technology and Equipment. Beijing: China National Coal Association, 2016: 220-224.
- [2]李伟.高速铁路下软岩采空区稳定性及变形控制研究[D].青岛:青岛理工大学,2018.  
Li W. Study on stability and deformation control of soft rock goaf under high-speed railway[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [3]张立才,刘燕龙.河北唐山某老采煤沉陷区建设场地地基稳定性评

- 价[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(12): 59-63.
- Zhang L C, Liu Y L. Construction site foundation stability assessment in an old gob subsidence area in Tangshan, Hebei[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(12): 59-63.
- [4] 郭松, 郭广礼, 李怀展, 等. 基于主成分层次聚类模型的采空塌陷场地稳定性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 116-121.
- Guo S, Guo G L, Li H Z, et al. Goaf-collapse sites stability evaluation based on principal component hierarchical clustering model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 116-121.
- [5] 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- Guo G L. Deformation mechanism and control of building foundation above old goaf area[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 郭广礼, 何国清, 崔曙光. 部分开采老采空区覆岩稳定性分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(3): 70-73.
- Guo G L, He G Q, Cui S G. Analysis of overlying strata stability over abandoned goaf with partial mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2003, 20(3): 70-73.
- [7] 汪吉林, 姜波. 煤矿采空区稳定性的模糊综合评判[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005, 22(2): 29-31, 34.
- Wang J L, Jiang B. Using fuzzy comprehensive judgement to evaluate the stability of coal caved area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2005, 22(2): 29-31, 34.
- [8] 王正帅, 刘冰晶, 邓喀中. 老采空区稳定性的模糊可拓评价模型[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 553-559.
- Wang Z S, Liu B J, Deng K Z. Fuzzy extension assessment model of old goaf stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 553-559.
- [9] 丁陈建, 汪吉林. 神经网络法的采空区地基稳定性评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 208-211.
- Ding C J, Wang J L. Using artificial neural network to assess the stability of goaf foundation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(2): 208-211.
- [10] 王正帅. 老采空区残余沉降非线性预测理论及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- Wang Z S. Study on the non-linear prediction theory of old goaf residual subsidence and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [11] 汪吉林, 吴圣林, 丁陈建, 等. 复杂地貌多煤层采空区的稳定性评价[J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 466-471.
- Wang J L, Wu S L, Ding C J, et al. Stability evaluation of mine goaf with multi-coal seams and complex landform[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 466-471.
- [12] 葛伟亚, 王睿, 张庆, 等. 城市地下空间资源综合利用评价工作构想[J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1601-1608.
- Ge W Y, Wang R, Zhang Q, et al. Conception of comprehensive utilization evaluation of urban underground space resources[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(10): 1601-1608.
- [13] 林良俊, 李亚民, 葛伟亚, 等. 中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1086-1101.
- Lin L J, Li Y M, Ge W Y, et al. General ideas for urban geological survey in China and key theory and techniques[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1086-1101.
- [14] 郭广礼, 查剑锋. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社有限责任公司, 2020.
- Guo G L, Zha J F. Mining subsidence science[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2020. (in Chinese)
- [15] 杨梅忠, 任秀芳, 于远祥. 概率积分法在煤矿采空区地表变形动态评价中的应用[J]. 西安科技大学学报, 2007, 27(1): 39-42.
- Yang M Z, Ren X F, Yu Y X. Application of probability integration to dynamic appraisal of surface distortion in coal depletion region[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2007, 27(1): 39-42.
- [16] 尹云旺. 基于 MATLAB 和概率积分法的预计程序开发与应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015.
- Yin Y W. Prediction system based on the probability integration method and MATLAB[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [17] 孙晖, 王超起. 某煤矿采空区场地稳定性综合评价[J]. 现代矿业, 2018, 34(6): 21-27.
- Sun H, Wang Q C. Integrated evaluation on site stability of goaf of a coal mine[J]. Modern Mining, 2018, 34(6): 21-27.
- [18] 苏栋, 黄茂隆, 韩文龙, 等. 城市深层地下空间地质环境韧性评估模型与应用[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 157-169.
- Su D, Huang M L, Han W L, et al. Evaluation model of geological environment resilience in the urban deep underground space and its application[J]. Geology in China, 2024, 51(1): 157-169.
- [19] 张静, 倪金, 马诗敏, 等. 基于 GIS 的大连市金普新区洪水淹没分析[J]. 地质与资源, 2021, 30(5): 590-594.
- Zhang J, Ni J, Ma S M, et al. GIS-based analysis of flood submergence in Jinpu New District, Dalian City[J]. Geology and Resources, 2021, 30(5): 590-594.
- [20] 张静, 马宏伟, 郇恒飞, 等. 基于 AHP 的大连金普新区地下空间开发利用地质条件适宜性评价[J]. 地质通报, 2023, 42(9): 1603-1609.
- Zhang J, Ma H W, Huan H F, et al. Suitability evaluation of geological conditions for underground space exploitation and utilization in Jinpu New Area of Dalian based on AHP[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(9): 1603-1609.
- [21] 石旭飞, 江山, 郭晓东, 等. 长吉图经济区地质灾害易发性区划研究[J]. 地质与资源, 2022, 31(5): 660-666.
- Shi X F, Jiang S, Guo X D, et al. Vulnerability zoning of main geological hazards in Changchun-Jilin-Tumen Economic Zone[J]. Geology and Resources, 2022, 31(5): 660-666.