

矿区地面沉降预计方法与应用前景分析

常占强^{1,2}, 官辉力^{1,2}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 地下矿产资源开采引起的地面沉降是世界上各矿产资源大国共同面临的一种严重环境问题, 我国也不例外。随着世界范围内矿产资源消耗量的急剧增长, 这种问题将日益突出。为了尽可能减轻由地下矿产开采引起的地面沉降, 对地面基础设施的损害与自然资源的破坏, 对地面沉降进行精确预计显得尤为重要。本文首先对国内外地下矿产开采引起的地面沉降主要预计方法的特点及适应性, 进行了系统地分析与总结。在此基础上, 作者依据各自的适应性, 将地面沉降预计方法分为两大类: (1) 对地面沉降空间分布规律的预计; (2) 对地面沉降时间变化规律的预计。进而, 提出了未来地面沉降预计中切实可行的研究方法, 主要包括: (1) 对具体地质采矿条件下地面沉降规律的预计研究; (2) 对地面沉降预计的时空统一问题的研究; (3) 地面沉降预计与实地监测的一体化的研究。最后, 作者分析了地下矿产开采引起的地面沉降预计前景。

关键词: 地下开采; 矿产资源; 地面沉降预计; 空间对地观测技术

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00151

1 地下矿产开采引起的地面沉降

地面沉降主要是由于开采地下矿产资源或过度开采地下水而造成的。在美国, 从旧金山湾/三角洲沼泽地到佛罗里达州和纽约州休斯敦已有 45 个州发生了地面沉降, 总沉降面积超过 44 030 km², 相当于新罕布什尔州和佛蒙特州的面积之和; 在我国, 已有一半的省份存在地面沉降^[1]。随着世界各国先后进入工业化阶段, 矿产资源的消耗量急剧增长, 由开采地下矿产资源引起的地面沉降已成为世界上各矿产资源大国共同面临的一种严重环境问题。上世纪 90 年代以来, 我国矿产资源消费量的增长速度已超过同期国民经济的增速, 因矿产资源开采引起的地面沉降面积已达 3 108 km², 由此造成的直接经济损失每年约 4 亿多元。其中, 仅山西省境内由地下开采造成地面沉降面积已超过 520 km², 河北开滦矿区地面沉降面积达 290 km²。可见, 为尽可能减轻由地下矿产开采引起的地面沉降对地面基础设施损害与自然资源的破坏, 对地面沉降进行深入研究和精确预计至关重要。

2 地面沉降的预计方法与应用分析

由地下开采引起的岩层和地面沉降, 是一个复杂的时间-空间过程。在过去几十年里, 为了揭示岩层和地表移动的内在规律, 世界各国岩石移动与地学工作者进行了大量的理论与实地监测分析, 提出了众多的地面沉降预计方法, 以求尽可能提高预计精度、减少地面沉降对地面设施的损害与自然资源的破坏。总体而言, 开采地下矿产资源引起的地面沉降预计方法可分为两大类: (1) 地面沉降空间分布规律的预计; (2) 地面沉降时间变化规律的预计。

2.1 地面沉降空间分布规律的分析理论与方法

对地面沉降空间分布规律的预计方法可分为四种方法: 连续介质理论、经验公式法、影响函数法和模拟法。

2.1.1 连续介质理论

连续介质力学理论是最早提出的地面沉降预计方法。该方法将上覆岩层简化为满足特定边界

收稿日期: 2010-09-30; 修回日期: 2011-03-23.

基金项目: 北京自然科学基金项目(8093032); 北京市教委科技研究计划项目(KM200910028016)。

作者简介: 常占强(1964-), 男, 河北人, 博士, 副教授。主要从事 3S 技术与地面沉降监测研究。

E-mail: changkkl@tom.com

条件的某种连续介质,利用相应的力学理论求取地表及岩层移动预测解析表达式。20 世纪 50 年代末,前苏联学者 C. T. 阿维尔申将采空区上覆岩层视为弹性梁,推导出上覆岩层变形表达式^[2-3]。随后,又有岩石移动工作者开展了视岩层为连续介质各向异性体的研究。然而,岩层本身是一种非连续介质,在开采或开挖卸荷条件下,变形规律复杂。连续介质理论预测模型理论过于简化,在实际应用受到很大的限制,很难用于地面沉降工程实际。

2.1.2 经验公式法

经验公式法又称剖面函数法或典型曲线法。其基本思想是对大量具有代表性的矿区地面沉降实地观测数据进行数理统计回归拟合,得到某种形式的典型曲线,再利用该形式的曲线对具有相似地质采矿条件的地面沉降进行预计。其优点是直接给出地表下沉盆地函数曲线的显式形式,且能够描述关于拐点非对称的下沉曲线。但是,经验公式法通常描述的下沉盆地是矩形采空区得到的,且地质、采矿条件要求较苛刻。比较有代表性的剖面函数(曲线)有:英国剖面函数法、前苏联剖面函数法、波兰剖面函数法和匈牙利剖面函数法等^[4],这里不再一一详细介绍。1965 年,煤炭科学院唐山研究所的岩移工作者在总结我国一些矿区的地表移动资料的基础上提出了负指数函数法^[5],其地面下沉盆地主断面上表达式如下:

$$W(x) = W_m \exp \left[-a \left(\frac{x}{L} \right)^b \right] \tag{1}$$

其中, L 为半盆地长度; W_m 为主断面上的最大下沉值; a 和 b 为下沉曲线形状参数系数; x 为坐标值。负指数函数法曾是我国地面沉降预计中较为常用的方法之一。需要指出的是,用该方法描述的是主断面上的地面沉降分布,无法对非主断面上的地面沉降预计。另外,如何求算 a 、 b 精确值仍然是一个值得进一步探讨的问题。

2.1.3 影响函数法

影响函数法的理论基础是建立在“随机介质”和“采动区域积分”基础上的,因此,又叫随机介质理论法。该方法首先由波兰学者李特威尼申(J. Litwiniszyn)提出的^[6],随后我国学者刘宝琛、廖国华对其进行了补充和完善^[7],提升了随机介质理论的实用性。影响函数法最具有代表性的是概率积分法^[8],此外,还有威布尔分布法、双曲线函数影响函数法等等^[9-10]。概率积分法将单元开采引起的上

覆岩层下沉视为随机事件,以事件发生的概率来描述岩层的沉降可能性,以及沉降量。地下单元开采所引起的地面沉降(单元下沉全盆地),即下沉概率分布密度函数一般取正态分布形式:

$$w_e = f(x, y) = \frac{1}{r^2} e^{-\pi \frac{x^2 + y^2}{r^2}} \tag{2}$$

其中, r 为地下开采主要影响半径。对整个采动区域进行积分可得到下沉全盆地的积分表达式:

$$W(x, y) = W_m \iint_S w_e d\sigma \tag{3}$$

其中, W_m 为地表最大下沉值; w_e 为单元下沉盆地; $d\sigma$ 为煤层面积微元开采单元。由(3)式知,影响函数法预计公式中含有概率积分(或其导数),即是以隐式给出。该方法较为成熟,目前在世界各国应用比较广泛,也是我国用于地表移动和变形预计的最为常用的方法之一。在实际应用中,该方法比较适合于充分和超充分采动条件下,而在非充分采动条件下的预计误差较大,甚至产生错误的预计结果。为此,我国学者王金庄、郭增长、戴华阳、郭文兵、邓喀中、查剑锋、郭广礼等提出一系列的修正方案^[11-13],主要是对预计模型本身与预计参数两方面进行了修正^[14],从而显著提高了预计精度。另外,西班牙学者 C. Gonza'lez Niciezaa, 和 M. I. A'lvarez Ferna'ndeza 等人于 2005 年提出了一种三维影响函数^[15],该函数理论上较严密,顾及了煤层物理力学性质与上覆岩层的滑动方向,还可以推广到非水平煤层的开采预计中,同时也需要较多的地质采矿以及煤层和围岩的力学参数。

2.1.4 模拟法

模拟法包括数值模拟法和物理模拟法。由于物理模拟法(相似材料模型法、光电模型法)一般只能模拟二维问题,很难模拟真实地下三维应力状态的开采边界条件。而且,物理模拟法主要用于作定性的或半定量的分析,很难对地表沉降进行定量化的分析和预计。因此,本文仅讨论数值模拟法。

数值模拟法是建立在数值逼近力学控制方程(平衡方程、几何方程、本构方程),以及具体问题边界条件基础之上的,目前,常用的方法有:有限元法(Finite Element Method, BEM)^[16]和有限差分法(Finite Difference Method, FDM)^[17-18]。

(1)有限元法:由于绝大多数地下开采引起的地面沉降问题很难用连续介质力学理论得到解析解,有限元法试图用数值方法对实际力学问题进行

模拟计算。其基本思路是将结构离散化,用有限多个小单元来表示复杂的实际对象,单元之间通过有限节点相互连接,然后根据变形协调条件综合求解。不过,在地下开采地面沉降预计中有限元法应用效果并不理想,主要原因是有限元方法中,力学平衡方程是通过变分原理以弱解形式满足的,因而不适合对非连续变形进行分析。

(2)有限差分法:该方法最有代表性的软件是由美国 Itasca 公司开发的 FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua)。它是一个采用的显式拉格朗日算法和混合-离散分区技术求解的三维有限差分软件^[18-19],在模拟岩层及地表沉降中显示了独特的优势,主要体现在:①对模拟塑性破坏和塑性流动采用的是“混合离散法”,比有限元法中采用的“离散集成法”更为准确、合理;②可解决众多有限元难以模拟的复杂问题,如:大变形、大应变、非线性问题;③可通过调整三维网格中的多面体单元来拟合实际的结构,能进行土质、岩石的三维结构受力特性模拟分析;④无需形成刚度矩阵,用较小内存空间能够求解大范围的三维问题。目前,有限差分法很可能是最适合对地面沉降建模的数值模拟方法,但该方法需要比较准确地掌握地质采矿条件和上覆岩层的力学参数,这一点在地面沉降预计中往往难以实现。

2.2 地面沉降时间变化规律的预计方法

当前对地面沉降时间变化规律的预计主要有三种方法:(1)Knothe 时间函数^[20]与改进的 Knothe 时间函数法^[21]; (2)双参数的 Sroka-Schober 时间函数法^[22]; (3)Logistic 增长曲线法^[23]。

2.2.1 Knothe 时间函数与改进的 Knothe 时间函数法

1952 年,波兰学者克诺特(Knothe)为用数学方法描述地下开采引起的地面沉降这一复杂的时空过程,建立了以下微分方程:

$$\frac{dW(t)}{dt} = C(W_m - W(t)) \quad (4)$$

其中, W_m 为地下开采引起的最大下沉值; C 为岩性时间系数; $W(t)$ 为任意时刻 t 地面点的下沉。2003 年,常占强、王金庄证明了用经典克诺特时间函数在描述地表点下沉第一阶段时存在较大误差,进而提出了更为合理的地表点下沉时间函数——“改进

的克诺特时间函数”,其表达式如下:

$$\frac{dW(t)}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{2}CW_m e^{-C(\tau-t)} & 0 < t \leq \tau \\ \frac{1}{2}CW_m e^{-C(t-\tau)} & \tau < t \leq T \end{cases} \quad (5)$$

其中, τ 为下沉第一阶段时间,其他符号与(4)式中对应符号的意义完全一致。经过理论证明和实际验证,改进的 Knothe 时间函数法可以较好地描述地表点下沉全过程。不过,下沉第一阶段时间参数 τ 需精确确定。

2.2.2 双参数 Sroka-Schober 时间函数法

1996 年,德国学者 Sroka 在研究固体矿物开采时的地面沉降中,考虑了开采所产生的空间收敛即多孔岩层的收敛与压实作用仿照 Knothe 单参数时间函数建立了双参数时间函数。

$$W(t) = W_m \left(1 + \frac{\xi}{f - \xi} e^{-ft} - \frac{f}{f - \xi} e^{-\xi t} \right) \quad (6)$$

其中, f 为上覆岩层的相对收敛率; ξ 为上覆岩层的时间系数用于描述岩层的滞后效应。

Sroka-Schober 时间函数的一阶导数更接近于理想的时间函数,但实际应用中岩层的相对收敛速率和矿床上覆岩层的时间参数难以确定,使得该方法在应用上收到了一定的限制。

2.2.3 Logistic 增长曲线法

2005 年,徐洪钟、李雪红根据地表点下沉过程与 Logistic 增长曲线所描述的规律非常相似,提出了利用 Logistic 增长模型来预测地面沉降随时间的变化规律。地表点下沉的 Logistic 时间函数曲线方程如下:

$$W(t) = \frac{W_m}{1 + ce^{-at}} \quad (7)$$

其中, W_m 为最大下沉量; t 为时间; a 为时间影响系数; c 为待求参数。Logistic 增长曲线法形式简单明了。不过,其时间影响系数 a 需大量实际观测资料求取。

3 地面沉降预计的研究方向与展望

3.1 研究方向

半个多世纪以来,经过几代岩石移动与地学工作者的不懈努力,已建立了一系列的岩层及地面沉降预计理论模型和方法,取得了丰硕的成果。目前,由地下矿产资源开采引起的地面沉降预计研究正快速向纵深方向开展。然而,由于地下开采引起

的岩层及地面沉降机理的复杂性和诸多影响因素的不确定性,仍有很多难题有待解决,需要岩石移动与地质工作者付出更为艰辛的努力。作者认为,今后的研究应主要集中在以下几个方面:

(1) 具体地质采矿条件下的地面沉降规律

众所周知,不同区域的工程地质条件千差万别。而在不同地质、采矿条件下,岩层与地表移动规律有明显差别,不可能应用某一种预计方法来揭示岩层及地表移动规律并获取精确的地面沉降预计结果。因此,针对具体地质、采矿、水文条件下岩层及地面沉降规律的研究势在必行。如厚松散层下开采、山区地形情况下的地下开采、倾斜和极倾斜矿层的开采、深部开采、极不充分开采、水体下开采、多煤层开采等等^[24-36],使得地面沉降预计模型有较强的针对性,同时也在一定程度降低了构建模型的难度,才可能获取与实际情况最为接近的预计结果。当前,这方面研究已经取得了一定的阶段性成果,但尚无法完全满足实际工程的需要。

(2) 地面沉降预计的时空统一问题

从岩层及地表移动对地面设施的破坏程度看,动态移动变形的影响要远远大于静态移动变形的影响^[30]。因此,对地表动态移动变形的精确预计具有特别重要的意义。目前,国内外尚缺乏研究、探讨地表移动预计的时空统一问题,即将以上提到的地面沉降空间分布规律与地面沉降时间变化规律统一起来。究其原因,一方面,将会遇到更复杂的数学—力学问题;另一方面,当前国内外这方面的实地观测资料较少。不过随着研究人员对矿区地表动态移动变形规律认识的不断深化,开展这方面的研究是十分必要的。

(3) 地面沉降预计与监测的一体化研究

由于影响地面沉降诸多客观因素的不确定性,在许多情况下仅利用地面沉降预计方法很难获取岩层与地面沉降的精确结果。因此,在积极改进和完善现有预计方法的同时,还应借助其他学科的先进技术手段对地表移动变形进行精确监测,以弥补地面沉降预计理论模型和方法的不足。利用遥感和全球定位系统对大范围地面沉降进行高精度监测,将获取的地面沉降信息作为先验知识,为预计模型提供较准确参数,或改进预计模型,从而有效提高模型的预计精度。即实现预计与监测一体化,地面沉降监测及其预计相互配合,是未来一段时间内重要研究方向之一。

3.2 前景展望

预见未来,一方面,随着各国岩石移动与地学工作者对现有岩层及地表移动规律认识的不断深化以及相关技术(如:三维地质模拟技术、数值模拟技术)的快速发展与日渐成熟,地面沉降的预计方法将不断完善,沉降预计精度将进一步提高;另一方面,以 InSAR 和全球定位系统为代表的现代空间对地观测技术的飞速发展,以及新型传感器数据的不断丰富,对地下开采引起的地面沉降进行高精度监测技术将日趋完善^[37-48]。该技术与地面沉降预计相互配合、互为补充,实现地面沉降预计与监测的一体化。这将在保护地面设施和自然环境中发挥更为重要的作用。

参考文献:

- [1] 阮煜琳. 中国一半省份存在地面沉降[J]. 共产党员, 2009(15):52.
- [2] C. T. 阿维尔申. 煤矿地下开采的岩层移动[M]. 北京:煤炭工业出版社,1959.
- [3] National Coal Board Mining Dept. Subsidence Engineer's Handbook[M]. National Coal Board, London, 1965.
- [4] Kratzsch H. Mining Subsidence Engineering [M]. Fleming R F S (Trans.). Springer-Verlag,1983,186-191.
- [5] 王世道. 有关负指数函数法的几个问题[J]. 矿山测量,1981(1):78-87.
- [6] Litwiniszyn J. Przemieszczenia gorotworu. ws wietle teorii prawdopodobienstwa[J]. Arch. Gor. Hut. T. II, 1954(1):45-68.
- [7] 刘宝探, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京:中国工业出版社,1965.
- [8] Oravec K I. Improved Prediction of Surface Subsidence Using the Infuence Function Approach[C]. Sangorm Symposium,1986: The Effect of Underground Mining on Surface,1986,73-80.
- [9] 沈光寒, 李白英, 吴戈. 矿山特殊开采理论与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,1991.
- [10] 何国清, 杨伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉降学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994.
- [11] 戴华阳, 王金庄. 非充分开采地表移动预计模型[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6):583-587.
- [12] 郭增长, 卢小平. 地表移动和变形的增量计算方法[J]. 矿山测量, 2003(3):12-14.
- [13] 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 概率积分法预计参数选取的神经网络模型[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3):

- 322-326.
- [14] 查剑锋,郭广礼,赵海涛,等. 概率积分法修正体系现状及发展展望[J]. 金属矿山,2008(1):15-18.
- [15] Nicieza C G, Fernández M I A, Díaz A M, Vigil A E A. The New Three-dimensional Subsidence Influence Function Denoted by $n-k-g$ [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005(42):372-387.
- [16] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
- [17] Alejano L R, Ramirez-Oyanguren P, Taboada J, Odriguez R. Numerical Prediction of Subsidence Phenomena Due to Flat Coal Seam Mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998(35):440-441.
- [18] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC3D Theory and Background [M], Minneapolis, Minnesota, USA, 2002.
- [19] Xie Heping, Chen Zhonghui, Wang Jiachen. Three-dimensional Numerical Analysis of Deformation and Failure during Top Coal Caving[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999,(36):651-658.
- [20] Knothe S. Time Influence on a Formation of a Subsidence Surface[J]. Archiwum Górnicztwa i Hutnictwa, Kraków (in Polish). 1952, 1(1):120-132.
- [21] 常占强,王金庄. 关于地表点下沉时间函数的研究——“改进的克诺特时间函数”[J]. 岩石力学与工程学报, 2003,22(9):1496-1499.
- [22] Kwinta A, Hejmanowski R, Sroka A. A Time Function Analysis Used for the Prediction of Rock Mass Subsidence[M]. // Gui Yuguang, Golosinski T S (eds.). Mining Science and Technology. Balkema A A. Rotterdam, Brookfield, 1996,419-424.
- [23] 徐洪钟,李雪红. 基于 Logistic 增长模型的地表下沉时间函数[J]. 岩土力学,2005,26(Supp.):151-153.
- [24] 王金庄,李永树,周雄,等. 巨厚松散层下采煤地表移动规律的研究[J]. 煤炭学报,1997,22(1):18-21.
- [25] 李凤明. 厚冲积层矿区地表移动参数的特点及数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(1):535-537.
- [26] 架元重,贾维花. 厚冲积层下开采地表移动分析[J]. 矿山压力与顶板管理,2001(3):81-82.
- [27] 常占强,王金庄. 厚松散层弯曲下沉空间问题研究[J]. 矿山测量,2003(3):36-39.
- [28] 何万龙,康建荣. 山区地表移动与变形规律研究[J]. 煤炭学报,1992,17(4):10-15.
- [29] 杨伦,于广明,王艳春,等. 地形条件对采动建筑物的影响[J]. 矿山测量,1994(1):40-44.
- [30] 李文秀. 山区岩层移动的 Fuzzy 预测模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(5):688-691.
- [31] 尹光志,鲜学福,代高飞,等. 大倾角煤层开采岩移基本规律的研究[J]. 岩土工程学报. 2001,23(4):450-453.
- [32] Dai Huayang, Wang Jinzhuang, Cai Meifeng. Seam Dip Angle Based Mining Subsidence Model and Its Application[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002(39):115-123.
- [33] 曹阳,颜荣贵,贺跃光,等. 崩落法开采急倾斜矿床地表变形预测新方法[J]. 矿冶工程,2002,22(4):5-8.
- [34] 何荣,郭增长,李春意. 大采深极不充分开采地表移动和变形规律实测研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2008,27(1):14-17.
- [35] 刘天泉“三下一上”采煤技术的现状及展望[J]. 煤炭科学技术 1995. 23(1):5-7.
- [36] Cui X M, Miao X X, Wang J A. Improved Prediction of Differential Subsidence Caused by Underground Mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2000(37):615-627.
- [37] 李德仁,周月琴,马洪超. 卫星雷达干涉测量原理与应用[J]. 测绘科学,1998,25(1):9-14.
- [38] 张景发,邵芸. 干涉成像雷达技术及其应用现状[J]. 地震地质,1998,20(3):278-288.
- [39] 王超,张红,刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [40] Strozzi T, Wegmüller U, Werner C, Andreas Wiesmann A. JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7):1702-1703.
- [41] 吴立新,高均海,葛大庆,等. 工矿区地表沉降 D-InSAR 监测试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005,26(8):778-781.
- [42] 刘国林,张连蓬,成枢,等. 合成孔径雷达干涉测量与全球定位系统数据融合监测矿区地表沉降的可行性分析[J]. 测绘通报,2005(11):10-17.
- [43] 张振生,孟昆,谷延群. D-InSAR 技术在矿山沉陷和地面沉降监测中的应用[J]. 华北地震科学,2006, 24(3):47-51.
- [44] Chang Zhanqiang, Gong Huili, Zhang Jingfa, Gong Lixia. A Feasible Approach for Improving Accuracy of Ground Deformation Measured by D-InSAR[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007,17(2):263-267.

- [45] Hahn Chul Jung, Sang-Wan Kim, Hyung-Sup Jung. Satellite Observation of Coal Mining Subsidence by Persistent Scatterer Analysis[J]. *Engineering Geology*, 2007, (92):1-13.
- [46] 王行风,汪云甲,杜培军. 利用差分干涉测量技术监测煤矿区开采沉陷变形的初步研究[J]. *中国矿业*, 2007, 16(7):77-80.
- [47] 张景发,郭庆十,龚利霞. 应用 InSAR 技术测量矿山沉降与变化分析——以河北武安矿区为例[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(5):651-657.
- [48] 邓喀中,姚宁,卢正,等. D-InSAR 监测开采沉陷的实验研究[J]. *金属矿山*, 2009(12):25-28.

Analysis and Prospect on the Prediction Methods of Ground Subsidence in Mining Area

CHANG Zhanqiang^{1,2}, GONG Huili^{1,2}

(1. *College of Resource, Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;*

2. *Key Lab of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Beijing 100048, China)*

Abstract: The ground surface subsidence due to underground mining of mineral resources is a kind of serious environmental issues over the world, which all the countries with abundant mineral resources are currently confronted with. China is not an exception. With the sharp increasing in mineral resources consumption, this issue will inevitably become more and more severe in the future. In order to greatly reduce the damages induced by ground surface subsidence to the infrastructures and natural environment, it is very important to predict the ground surface subsidence precisely. In the present paper, the authors, first of all, made a systematic and comprehensive analysis on the characteristics and applicability of the major ground subsidence prediction methods currently used at home and abroad. Then, according to their applicability, the authors suggested that the major ground subsidence prediction methods should be divided in to two categories: (1) the prediction methods on spatial domain distribution; (2) the prediction methods on the temporal domain variation. In addition, several feasible and significant directions in the investigation of the ground subsidence prediction were put forward, including (1) on the ground prediction under the concrete circumstances of geology and mining; (2) on the unification problem for the spatial distribution and the temporal variation in the prediction of the ground surface subsidence; and (3) on the integration problem of ground temporal subsidence prediction and field monitoring. Finally, the authors conducted the prospect on the prediction of ground surface subsidence, in which the cooperation and supplement between the prediction methods of ground surface subsidence and the advanced modern space Earth observation monitoring techniques, such as Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System were emphasized and expected to substantially improve the prediction accuracy of ground surface subsidence and utmost reduce the damages induced by underground mining of mineral resources. Along with the continuously increasing demands for mineral resources, the investigation on ground surface subsidence prediction is expected to play a more important role in the protection of ground surface facilities and natural environments in the future.

Key words: underground mining; mineral resources; ground surface subsidence prediction; earth observation technology