

抚顺某石油厂区地面沉降成因分析及其预测

郭锐

(辽宁有色勘察研究院有限责任公司, 沈阳 110013)

摘要: 在研究抚顺某石油厂区地质环境条件的基础上,分析其地面沉降产生的原因,并基于厂区某地面沉降监测点连续8a的实际监测数据建立灰色预测模型,该模型预测平均相对误差9.69%,误差较小,可以满足实际工程需要。然后据此模型对厂区未来3a的地面沉降变形进行预测,预测结果显示该厂区地面沉降仍在持续,但年度沉降值有减小的趋势,该预测结果总体上反映了厂区地面沉降变形的变化规律和发展态势。

关键词: 地面沉降;成因分析;灰色系统理论;预测

中图分类号: P642.26;X141 **文献标识码:** A

CAUSE ANALYSIS AND GREY THEORETICAL PREDICTION ON LAND SUBSIDENCE IN FUSHUN OIL PLANT

GUO Rui

(Liaoning Non-ferrous Geological Exploration and Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110013, China)

Abstract: On the basis of studying the geological environment conditions of a oil plant in Fushun, the causes of ground subsidence are analyzed, and a grey prediction model is established based on the actual monitoring data of a certain ground subsidence monitoring point in Fushun for 8 years. The average relative error of the model is 9.69%, which is small and can meet the needs of practical engineering. Then, based on the model, the land subsidence deformation of the plant area in the next three years is predicted. The prediction results show that the land subsidence of the plant area is still continuous, but the annual settlement value tends to decrease. The prediction results generally reflect the change law and development trend of the land subsidence deformation of the plant area.

Key words: land subsidence; cause analysis; grey theory; prediction

1 前言

地面沉降是指在自然和人为作用下,由于地壳表层土体压缩而导致区域性地面标高降低的一种环境地质现象,它具有持续时间漫长、形成缓慢、形成机理复杂、影响因素众多和治理难度极大的特征,同时也是一种对资源利用、环境保护、经济发展、城市

建设和人民生活构成威胁的地质灾害^[1-4]。随着我国社会主义现代化建设的蓬勃发展,对矿产资源尤其煤矿的需求不断增加,建成了一系列如抚顺西露天矿、阜新海州矿、山西大同煤矿等大型矿山,矿产资源的地上地下开采,使得矿区及其周边产生了严重的地面沉降,给城市的可持续性发展和人民生活带来了巨大隐患。目前国内关于地面沉降的研

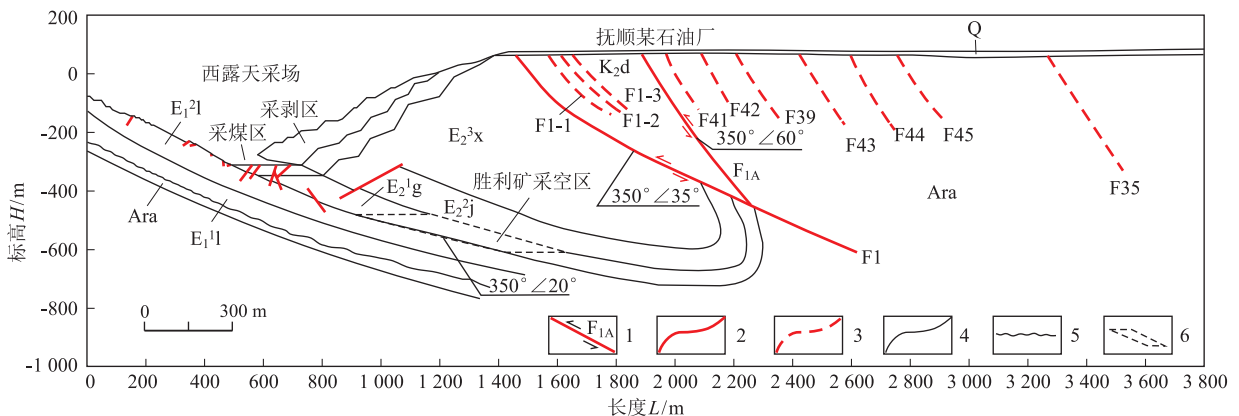
究主要针对地下水开采及矿产地下采空产生的地面沉降,主要集中在地面沉降成因机理^[5-7]、沉降监测^[8-10]、发生发展过程模拟及其预测研究^[11-13]、防治技术研究^[14,15]等方面,但对于复杂地质构造环境条件下露天与井采混合开采产生的地面沉降研究甚少。

抚顺某石油厂是一家现代化的国有大型炼油企业,始建于1928年。该石油厂位于抚顺西露天矿坑北面,距离矿坑边最近处仅80m。由于受石油厂区所处区位、复杂地质构造环境及矿山露天开采和井工开采的直接影响,从1984年开始,厂区地面发生严重变形,造成建筑物下沉、倾斜、开裂,威胁生产和人身安全。为了全面了解厂区地面沉降变化规律及其发展趋势,该石油厂自1997年就建立了完善的地面沉降监测网络,对地面变形实施定期监测。多年的监测数据反映该厂区地面变形处于逐年加剧的趋势,严重影响了企业的正常生产,同时也影响了企业的经济发展效益和未来的发展规划。因此对该厂区处于复杂地质环境条件下的地面变形进行成因机理分析并做出科学合理的预测显得十分必要。

2 厂区地质环境特征

2.1 地形地貌

本石油厂区地面比较平坦,高程间于73.40~



Ara. 太古代地层; K. 中生代白垩系; E. 新生代第三系

图1 研究区工程地质平面图

Q. 第四系亚粘土、中粗砂、圆砾; E₂³x. 下第三系西露天组: 绿色页岩; E₂²j. 下第三系计军屯组: 油母页岩; E₂¹g. 下第三系古城子组: 主煤层; E₁²l. 下第三系栗子沟组: 凝灰岩凝灰质砂岩; E₁¹l. 下第三系老虎台组: 玄武岩; K₂d. 下白垩系鞍山群中生界太古界大峪组: 泥岩、页岩、碎屑岩; Ara. 下白垩系鞍山群中生界太古界花岗混合岩、片麻岩; 1. 压扭性断层及编号; 2. 实测断层; 3. 物探解释断层; 4. 地质界线; 5. 不整合线; 6. 胜利矿采空区

图2 研究区工程地质剖面图

2.3 地质构造与地震

(1) 地质构造

厂区区域地质构造条件异常复杂,褶皱构造和断裂构造发育数量多且规模大,其中最具代表性的断裂带有断裂F1和断裂F1A,此外,次级断裂构造

77.80 m,高差为4.4 m,其所在地貌类型为河流冲积平原一级阶地。由于西露天矿坑的经年开采,在该石油厂南面形成了一个巨大矿坑,被称为亚洲第一矿坑。该矿坑东西长而南北窄,其中东西长约6 600 m,而南北宽约2 200 m,面积可达10.87 km²,矿坑最大深度可达400 m,靠近石油厂区的北帮开采边坡终期坡角在20°~31.8°。故厂区地形复杂,而地貌较为简单。

2.2 地层岩性

厂区揭露地层上部为第四系地层,下部为基岩,岩层从新到老主要为:新生界第三系栗子沟组与老虎台组,属于该区域主要的含煤岩系;其次为白垩系大峪组;最下部为太古界鞍山群通什村组和石棚子组地层(图1、图2)。

发育数量也较多。在喜马拉雅造山运动的影响下,厂区所在区域地层发生了近SN方向的挤压,而在近EW方向上却发生伸长变形,即是说地层岩体发生了沿应变椭圆短轴向的破裂,从而形成了近SN方向的横向正断层。此后,随着区域地壳运动的不断

发生,形成了NW~SE向的斜向正断层。通过地球物理勘探及遥感探查工作,发现有多条压扭性断裂发育于断裂带F1与断裂带F1A间及其上盘中,这些压扭性断裂呈近EW方向展布。据推测,这是由于抚顺西露天矿矿坑的不断开采,造成近SN方向的挤压作用反复变化而形成的。

(2) 区域地震

本厂区区域地震有两种类型,包括构造地震与采矿诱发的地震即矿震,其中构造地震大多为浅源地震,震级基本在3.0级左右,震源深度一般可达10 km,具有规模较小、发生频率较高、地震破坏能力小等特点;而西露天矿矿震震源深度较浅、影响范围较小、地震级数较低,但破坏力大。1933年以来,区域内煤田矿震的发震频率和矿震震级总体呈递增趋势。

2.4 水文地质特征

厂区地下水类型主要包括第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。潜水含水层主要为细砂层、粗砂层和卵石层,渗透系数基本为 4×10^{-4} m/s,单位涌水量为17.7~24.8 l/s·m,富水性强。静止水位埋深为3.10~4.10 m,以大气降水为主要补给来源,另外厂区内生活生产排水的渗漏也起到一定的补给作用,地下水水位变幅约为2.0 m/a。基岩裂隙水含水岩层主要为花岗片麻岩、砂岩-砂砾岩、含煤油页岩和页岩等。在断裂F1与断裂F1A的共同切割作用下,区域下伏基岩被分割为片麻岩构造裂隙水文地质单元、砂岩构造裂隙水文地质单元和第三系构造裂隙水文地质单元等3个含水地质单元。在厂区地下岩层岩性及其地质构造发育程度差异的影响下,基岩含水层的富水性具有很大的差异。裂隙水补给方式主要为冲积层越流和溢流补给、沿F1A、F1断层越流补给、绿色泥岩上部构造裂隙含水单元的下渗补给和大气降水补给。厂区内地下水径流由北向南方向,排泄方式主要为采矿边坡面的大气蒸发和侧向排渗。此外,局部水平向排水孔、泉在地下水排泄上起到重要作用。

2.5 人类工程活动

在厂区南最近约80.0 m处为西露天矿矿坑,其下还存在胜利矿井工开采形成的采空区,以及石油厂区内的工程建设等人类活动使得地质环境破坏较为强烈。

3 厂区地面沉降形成原因分析

根据长达20多年的变形监测资料,该石油厂区内地面均有沉降变形和水平变形,其中断层F1A北

侧地面变形幅度较小,越向北,距离断层F1A越远则变形越小;而断层F1A向南,距离西露天矿坑越近则地面变形越大。地面水平位移规律与沉降变形规律基本一致。以该厂区A测线13个沉降监测点长达14 a的观测数据为例,断层F1A以北沉降量达到143.9~964.0 mm,断层F1A以南沉降量达到1 168.7~>5 813.9 mm,其中最大沉降点为位于断层F1A上的5[#]监测点。断层F1A以北水平位移41.61~513.67 mm,越往北、越远离F1A断裂越小;断层F1A以南较大,水平位移可达1 226.09~>3 364.77 mm(10[#]监测点),越接近西露天矿越大。多年的监测数据反映该厂区地面沉降仍处于变形发展过程中(图3)。

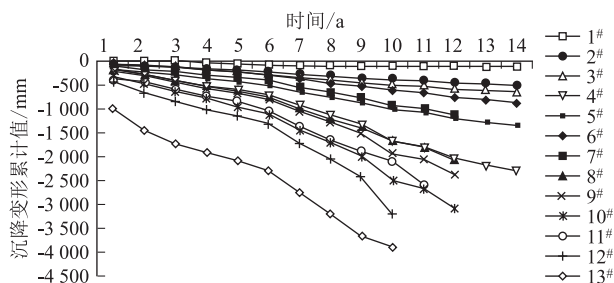


图3 厂区A测线各监测点地面沉降随时间变化图

影响厂区地面沉降变形的因素有很多,主要有地质构造、露天矿采掘、井工开采和地下水的影响等。其中地质构造上存在的断裂带F1A是地表变形的内在原因,由于F1、F1A两条断层的逆掩超覆作用,将不同地质年代、不同岩性的3个地质块体组合在一起,露天矿北帮褐色页岩泥化层的蠕变特性和特殊的地质构造,造成断层F1南部含煤岩系地层产生连锁式倾倒—滑移—再倾倒—再滑移运动,这种运动的结果使F1、F1A逆冲断层间白垩系倒置三棱体在岩层自重和倾倒力矩的作用下克服自身强度向南倾倒,致使断裂带F1A形成离层空化现象。由于岩层物理力学性质的不同,在产生相对移动和变形上存在一个“时间差”,这就造成“暂时”的离层带现象。动态发展的离层空化带是厂区南部地基变形和向北扩展的根本原因,这种下沉现象是缓慢的、持续的。

抚顺西露天矿采掘是厂区地表变形的直接原因,矿坑北帮的地质构造条件异常复杂,井工开采和露天开采的采矿活动对地表变形的影响随时间推移而变化,其中井工开采活动于20世纪60年代末和20世纪70年代初陆续停止,而露天开采在20世纪80年代初地面境界业已到界,近30 a的露天开采工程主要表现在采坑加深和边帮坡角不断变陡。露天

采矿诱发地面沉降的因素主要包括两个方面：一方面是因为开采边坡轮廓线的变化如采坑加深和边坡坡角变陡而引发的地面沉降变形，另一方面是特殊且复杂的地质构造条件和采矿活动，使得边坡岩体发生倾倒滑移变形，且向上部地面发展，进而引发地面沉降变形。

另外，其他影响因素对厂区地面沉降变形也产生了重要的影响，如断裂构造对厂区地面变形起到的放大和扩展作用，并采区的上覆岩土层由于露天开采活动的发展而受到循环扰动，第四系地下水向采矿边坡临空面的侧向渗流和疏干抽排，会引发第四系土层的沉降固结及机械潜蚀变形。

4 厂区地面沉降预测

影响该石油厂厂区地面沉降变形的因素有很多，除自然因素外，还有如矿山开采、地下水抽排等人类活动因素，该地面沉降变形是由多种影响因素共同作用的综合结果，虽然目前对于地面沉降的预测预报研究有很多，但没有哪一种理论能够充分考虑多种影响因素。从各种影响因素的内在关联性及其对地面沉降变形的影响水平分析，各因素及其对地面沉降的影响并不是简单的一一对应和相互叠加的关系，应该是非确定性的灰色关系。灰色系统理论是研究少数据不确实性的理论，它可以在分析已知少数据演化规律基础上，对未知数据进行预测^[16]。因此，对于该石油厂厂区地面沉降，采用灰色理论预测模型进行预测是可行且合理的。从厂区内 20 多年的地面沉降监测数据来看，地面变形与时间的关系曲线表现出“S”型非平稳的变化特性，因此，本研究以厂区内代表性监测点 A8# 连续 8 a 的监测数据为样本，构建灰色理论 GM 预测模型，并对其未来 3 a 的地面沉降变形进行预测，以反映灰色系统理论预测模型在该厂区地面沉降预测中应用的可行性。

4.1 地面沉降 GM 预测模型的构建

(1) 灰数的生成^[17]

考虑到厂区地面变形实际观测数据具有无规律性和随机性，故可将其看成为在某一定区间内变化的灰量。为找到地面变形现场观测数据的变化规律，本研究对各变形观测数据即灰量进行一次累加，从而生产一次累加灰色序列数据，其中累加算法定义为：

$$x_k^1(i) = \sum_{s=1}^i x_k^0(s) \quad (1)$$

其中， $x_k^1(i)$ 为一次累加灰色序列； $x_k^0(s)$ 为原始监

测数据序列。

(2) 模型的建立^[17]

利用累加生成算法形成的一次累加灰色序列为 $x^{(1)}$ ，建立 GM(2,1) 白化方程如下：

$$\frac{d^2 x^{(1)}}{dt^2} + a \frac{dx^{(1)}}{dt} = b \quad (2)$$

其中， $\hat{a} = [a, b]^T$ 为参数列，可以采用最小二乘法进行估计有： $\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y$

$$B = \begin{bmatrix} -x^{(0)}(2) & 1 \\ -x^{(0)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -x^{(0)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \alpha^{(1)} x^{(0)}(2) \\ \alpha^{(1)} x^{(0)}(3) \\ \dots \\ \alpha^{(1)} x^{(0)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) - x^{(0)}(1) \\ x^{(0)}(3) - x^{(0)}(2) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) - x^{(0)}(n-1) \end{bmatrix}$$

(3) 模型精度的检验

为了验证灰色理论预测模型的可行性及其预测结果的精确性，本研究采用后验差检验法进行预测模型精度检验，模型检验标准参见表 1。

记 k 时刻残差为 $\varepsilon(k)$ ，则

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$$

相对误差 Δ_k 为

$$\Delta_k = \frac{|\varepsilon(k)|}{x^{(0)}(k)}$$

式中， $x^{(0)}(k)$ 为原始监测数据； $\hat{x}^{(0)}(k)$ 为预测数据。

设 T_1 为原始监测数据的均方差， T_2 为残差 $\varepsilon(k)$ 的均方差，则检验指标如下：

① 后验差比

$C = T_2/T_1$ ，若给定一个大于 0 的值 C_0 ，当 $C < C_0$ 时，则预测模型属均方差比合格的模型。

② 小误差概率值

$u = U(|\varepsilon(k) - \varepsilon| < 0.674 \cdot 5T_1)$ ，若给定一个大于 0 的值 u_0 ，当 $u < u_0$ 时，则该预测模型属小误差概率值合格的模型。

表 1 模型精度检验等级参照表^[7,18]

预测精度	好	合格	勉强	不合格
u	>0.95	$0.95 \sim 0.80$	$0.80 \sim 0.70$	<0.70
C	<0.35	$0.35 \sim 0.50$	$0.50 \sim 0.65$	>0.65

4.2 地面沉降预测结果及其分析

本文以厂区内代表性监测点 A8# 连续 8 a 的实际监测数据为基础，按照上述灰色理论建立灰色 GM 预测模型，经过模型精度检验，本文所构建预测模型后验差比值 $C=0.260 < 0.35$ ，而小误差概率值 $u=1.0 > 0.95$ ，故预测精度为好，可以以此模型实

施地面沉降变形预测。对该厂区监测点 A8[#] 未来 3 a 的沉降变形预测结果如表 2。

表 2 监测点 A8[#] 地面沉降监测数据及其预测值

监测年数	沉降观测值 /mm	累积沉降值 /mm	预测值 /mm	相对误差 /%
1	-238.30	-238.30		
2	-186.20	-424.50	-369.81	12.88
3	-242.45	-666.95	-622.41	6.68
4	-298.70	-965.65	-860.09	10.93
5	-363.70	-1 329.35	-1 083.71	18.48
6	-120.00	-1 449.35	-1 294.12	10.71
7	-130.83	-1 580.18	-1 492.10	5.57
8	-142.64	-1 722.82	-1 678.38	2.58
9	—	—	-1 853.64	
10	—	—	-2 018.55	
11	—	—	-2 173.71	

从表 2 可以看出,以监测点 A8[#] 连续 8 a 的监测数据为基础构建的灰色理论 GM 预测模型预测相对误差在 2.58%~18.48%,平均相对误差 9.69%,基本满足实际工程需要,预测误差在可接受范围。根据监测点 A8[#] 未来 3 a 累积沉降变形预测值,通过灰色序列累减法可以求出其未来 3 个年度的变形沉降值分别为:175.26 mm、164.91 mm 和 155.16 mm。

从该监测点未来 3 a 的预测沉降值看出,该厂区地面沉降仍在持续,但年度沉降值有减小的趋势,考虑该厂区南侧西露天矿的闭坑对其地面沉降变形影响减小,随着时间的推移,该厂区地面沉降变形将有趋于稳定的可能。

5 结论

通过对厂区地质环境特征的调查研究及地面沉降变形的形成原因分析,以现场监测点实际监测数据为样本构建灰色理论 GM(2,1)预测模型,对厂区内监测点 A8[#] 未来 3 a 的沉降值及其地面沉降变形发展趋势实施预测,得出结论如下:

(1) 厂区内复杂的地质构造条件及矿山开采和工程建设活动诱发并加剧了地面沉降地质灾害,该灾害持续时间长、分布范围广、防治难度大。

(2) 基于现场实测沉降变形数据构建的灰色理

论 GM(2,1)预测模型可以对厂区地面沉降变形进行预测,预测平均相对误差为 9.69%,误差较小,预测结果能够满足工程需要。该厂区未来 3 a 的预测结果总体上反映了该区地面沉降变形的变化规律和发展态势。

参考文献

- [1] 赵全. 地面沉降数学模型及其应用的研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [2] 彭青华. 沧州市地面沉降模型研究[D]. 北京:中国地质大学,2007.
- [3] 周志广,姚文生,谢铁,等. 基于灰色理论的时间序列分析在地面沉降预测中的应用[J]. 地质灾害与环境保护,2012,23(4):52-57.
- [4] 郭锐. 抚顺某发电厂厂区地面沉降的研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [5] 薛禹群,张云,叶淑君,等. 我国地面沉降若干问题研究[J]. 高校地质学报,2006,12(02):153-160.
- [6] 王小刚,陈松,王秀芹,等. 德州市地面沉降成因及防治对策浅析[J]. 地质灾害与环境保护,2006,17(3):62-66.
- [7] 周志广,姚文生,张丽. 抚顺发电厂地面沉降成因分析及其灰色理论预测[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):83-87.
- [8] 熊福文,朱文耀,李家权. GPS 技术在上海地面沉降研究中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(4):164-171.
- [9] 丁继新,尚彦君,杨志法,等. 天津市市区地面沉降的 GPS 监测分析[J]. 工程勘察,2004,(6):41-44.
- [10] 陈基炜. InSAR-GPS-GIS 数据整合在地面沉降研究中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2004,24(3):87-91.
- [11] 许国辉,张新长. 用 AR 模型建立变形预测模型的研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2004,43(1):107-109.
- [12] 郑良飞,折学森. 地面沉降的 GM(2,1)模型预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2007,18(4):66-69.
- [13] 曹丽文,姜振泉. 神经网络在煤矿开采沉陷预计中的应用研究[J]. 中国矿业大学学报,2002,31(1):23-26.
- [14] 邓珍琴,李政纲,成云海. 基于仿真计算的永城矿区采空区地表沉陷防治研究[J]. 矿业安全与环保,2007,34(5):7-9.
- [15] 李永树. 地面沉陷对路基的破坏影响及其防治技术[J]. 测绘工程,2003,12(3):3-6.
- [16] 刘荣洪,周俊,朱庆川. 改进的灰色预测模型在地面沉降预测中的应用[J]. 地质灾害与环境保护,2007,18(3):104-107.
- [17] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [18] 宋彦辉,聂德新. 基础沉降预测的 Verhulst 模型[J]. 岩土力学,2003,24(1):123-126.

作者简介: 郭锐(1984—),男,满族,辽宁沈阳人,本科学历,硕士学位,高级工程师,主要从事岩土工程和防灾减灾方面的研究。

E-mail:15840238669@163.com