2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2256-2267
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

代方园,张航,郑灿政,等.2026.城市地区多层充水薄层煤采空区沉降变形分析——基于多因素影响下的探测与模拟计算研究,以济南地铁 8 号线为例.地球物理学进展,41(5):2256-2267,doi:10.6038/pg2026JJ0073.

DAI FangYuan, ZHANG Hang, ZHENG CanZheng, *et al*. 2026. Settlement deformation analysis of goaf with multilayer water-filled thin coal seams in urban areas—a study on detection and simulation calculation under multi-factor influence with Jinan Metro Line 8 as a case. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2256-2267,doi:10.6038/pg2026JJ0073.

城市地区多层充水薄层煤采空区沉降变形分析——基于多因素影响下的探测与模拟计算研究,以济南地铁 8 号线为例

Settlement deformation analysis of goaf with multilayer water-filled thin coal seams in urban areas—a study on detection and simulation calculation under multi-factor influence with Jinan Metro Line 8 as a case

代方园[1,2],张航[3#],郑灿政[4],胡韬[1,2*],付阳[4],孙兴昊[3],郭秀军[3*]

DAI FangYuan[1,2], ZHANG Hang[3#], ZHENG CanZheng[4], HU Tao[1,2*], FU Yang[4], SUN XingHao[3], GUO XiuJun[3*]

1. 山东省地矿工程勘察院,济南 250014
2. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心,济南 250014
3. 山东省海洋环境地质工程重点实验室,中国海洋大学,青岛 266100
4. 济南轨道交通集团有限公司,济南 250014

1. *Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute*, *Jinan* 250014, *China*
2. *Shandong Provincial Engineering Research Center for Groundwater Environmental Protection and Remediation*, *Jinan* 250014, *China*
3. *Key Laboratory of Shandong Province for Marine Environment and Geological Engineering*, *Ocean University of China*, *Qingdao Shandong* 266100, *China*
4. *Jinan Rail Transit Group Co., Ltd.*, *Jinan* 250014, *China*

摘 要 城市地下空间开发过程中,煤炭采空区引发的地面沉降严重威胁轨道交通工程安全.本文以济南地铁 8 号线穿越的圣井矿区为研究对象,旨在构建一套集精细地球物理探测、多方法沉降对比分析与地下水-岩体流固耦合模拟于一体的综合研究框架,为富水矿区城市轨道交通工程变形风险评估与抗变形设计提供理论依据.本文采用以瞬变电磁法(TEM)为主的综合地球物理探测策略圈定充水采空区范围,并通过 5 个钻孔进行验证.随后,分别运用概率积分法与 FLAC3D 三维数值模拟法,对 3 煤和 9 煤采空区引起的地表沉降变形进行计算对比.数值模型综合考虑了 22 个岩层差异及断层弱化效应,并在此基础上设置枯水

Abstract During the development of urban underground space, ground subsidence triggered by legacy coal mine goafs poses a severe threat to the safety of rail transit engineering. Taking the Shengjing mining area traversed by Jinan Metro Line 8 as the study area, this paper aims to construct an integrated research framework encompassing refined geophysical detection, comparative multi-method settlement analysis, and fluid-solid coupling numerical simulation. The objective is to provide a theoretical basis for deformation risk assessment and anti-deformation design of urban rail transit in water-rich mining areas. A comprehensive geophysical strategy, primarily utilizing the Transient Electromagnetic Method (TEM), was applied to delineate the distribution of water-filled goafs, the reliability of which was verified by five boreholes. Subsequently, the Probability Integral Method (PIM) and FLAC3D three-dimensional numerical simulation were employed to calculate and compare the surface settlement

收稿日期 2025-11-15; **修回日期** 2026-03-17. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心(筹)开放基金项目资助.

第一作者简介 代方园,高级工程师,从事物探及水文工作.E-mail:596677856@qq.com

#共同第一作者 张航,硕士,从事瞬变电磁法研究.E-mail:979367276@qq.com

***通讯作者** 胡韬,正高级工程师,从事水工环工作.E-mail:424284238@qq.com

郭秀军,博士,教授,博士生导师,从事海洋环境地质及电阻率成像研究.E-mail:guojunqd@ouc.edu.cn

期(水位埋深50 m)与丰水期(水位埋深20 m)工况,开展流固耦合模拟.研究发现:(1) TEM清晰识别了研究区"高-低-高"三层地电结构,低阻异常带与钻孔揭示的充水采空区高度吻合;(2) 概率积分法预测地表最大沉降值为864.12 mm,而FLAC3D模拟结果为915.3 mm,前者因未考虑多煤层叠合扰动及断层活化存在低估;数值模拟揭示F11断层导致变形不连续,多煤层开采使上部煤层底板由隆起转为沉降;(3) 地下水显著加剧沉降:相较无水工况,枯水期与丰水期地表最大沉降分别增加9.96%(达1006.5 mm)和32.3%(达1210.9 mm),孔隙水压力升高是主控机制.概率积分法与数值模拟法宜联合使用、互为验证.本研究量化了地下水对老采空区的活化权重,弥补了传统经验公式在水敏性地层中的适用性缺陷,成果可为类似富水矿区地下工程安全评估提供科学参考.

关键词 煤炭采空区;薄层采空区探测;沉降计算;瞬变电磁法

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0073

CSTR:32085.14.pg2026JJ0073

caused by the No. 3 and No. 9 coal seam goafs. The 3D numerical model systematically accounted for the lithological differences of 22 strata and the weakening effects of faults. Furthermore, fluid-solid coupling simulations were conducted under two scenarios: dry season (groundwater depth of 50 m) and wet season (groundwater depth of 20 m), to quantitatively evaluate the impact of groundwater level fluctuations on subsidence. (1) TEM clearly identified a "high-low-high" three-layer geoelectric structure, and the delineated low-resistivity anomaly zones were highly consistent with the water-filled goafs revealed by drilling. (2) The maximum surface settlement predicted by PIM was 864.12 mm, whereas the FLAC3D result was 915.3 mm. PIM carries a risk of systematic underestimation as it fails to account for the overlapping disturbance of multiple seams and fault activation. The numerical simulation also revealed that the F11 fault causes discontinuous deformation, and multi-seam mining transforms the floor of the upper coal seam from heaving to settling. (3) Groundwater significantly intensifies subsidence: compared to the dry condition, the maximum surface settlement increased by 9.96% (reaching 1006.5 mm) in the dry season and by 32.3% (reaching 1210.9 mm) in the wet season. The primary controlling mechanism is the increase in total stress on the rock mass due to elevated pore water pressure. It is recommended that PIM and numerical simulation be used jointly for mutual verification. This study quantified the reactivation weight of groundwater on legacy goafs, addressing the limitations of traditional empirical formulas in water-sensitive strata. The findings provide a scientific reference for settlement prediction and safety evaluation of similar underground engineering projects in water-rich mining areas.

Keywords Coal mining goaf; Thin-seam mining detection; Settlement calculation; Transient Electromagnetic Method (TEM)

0 引 言

在中国,随着城市扩张,一些潜在地质灾害风险区正在成为城市的组成部分,为基础设施建设带来新的风险因素.济南轨道交通8号线途经济南东部民泰、李福、圣井、埠村等多个煤炭采空区.其中,圣井矿区多煤层分布,工程地质条件复杂,有多条断层穿越矿区,而且地下水资源丰富、采空区充水现象普遍存在.采空区沉降引起的地表开裂、沉陷、变形对地铁轨道造成影响(卫达宁和王世杰,2024;Carlson *et al*., 2020;Wouters *et al*., 2025).为精确评估潜在风险,需要对采空区进行精准探测(陈江军等,2018;田忠斌等,2022;姚金等,2023;王艳波,2025),对变形量进行准确计算.

目前,采空区沉降变形的计算方法主要包括经验公式法、影响函数法和数值模拟法(迟凤妹等,2025;计烜等,2025;Postolachi *et al*., 2026)等.影响函数法将整个煤层开采后形成的地表变形看作是多个单元下沉盆地的集合,以此来计算出采空区引起的地表的沉降变形.在影响函数法中,概率积分法最为常见(迟凤妹等,2025;计烜等,2025),然而,概率积分法基于随机介质理论,本质上是一种几何学方法,它难以考虑岩土体的物理力学性质差异,尤其是地下水-岩土体相互作用对岩体强度的弱化效应(张村等,2025)以及断层构造对应力传递的控制作用(张雷和何昌荣,2014;罗锦等,2022).这导致在富水、断层发育的复杂地质条件下,概率积分法的预测结果往往偏于保守,存在安全隐患.近年来,随着计算机技术的迅速发展,数值模拟方法迅速发展,出现了多个采空区沉降变形数值模拟软件,主要包括基于有限差分法的Flac3D等软件(张村等,2025;罗锦等,2022),基于有限元法的MIDAS和ANSYS等软件(Postolachi *et al*., 2026).不同计算方法适用条件和计算技术路线有所不同.

为精确确定济南轨道交通8号线圣井矿区沉降特征,在本论文中,我们首先利用瞬变电磁法精准探测采空区分布,然后分别利用概率积分法和数值模拟法,对充水薄层煤炭采空区引起的沉降变形进行了计算分析,确定计算结果的适用性;通过数值模拟,模拟不同地下水水位下,分析充水薄层煤炭采空区引起的地表沉降变形和地层沉降变形,为轨道方案设计提供数据支持.

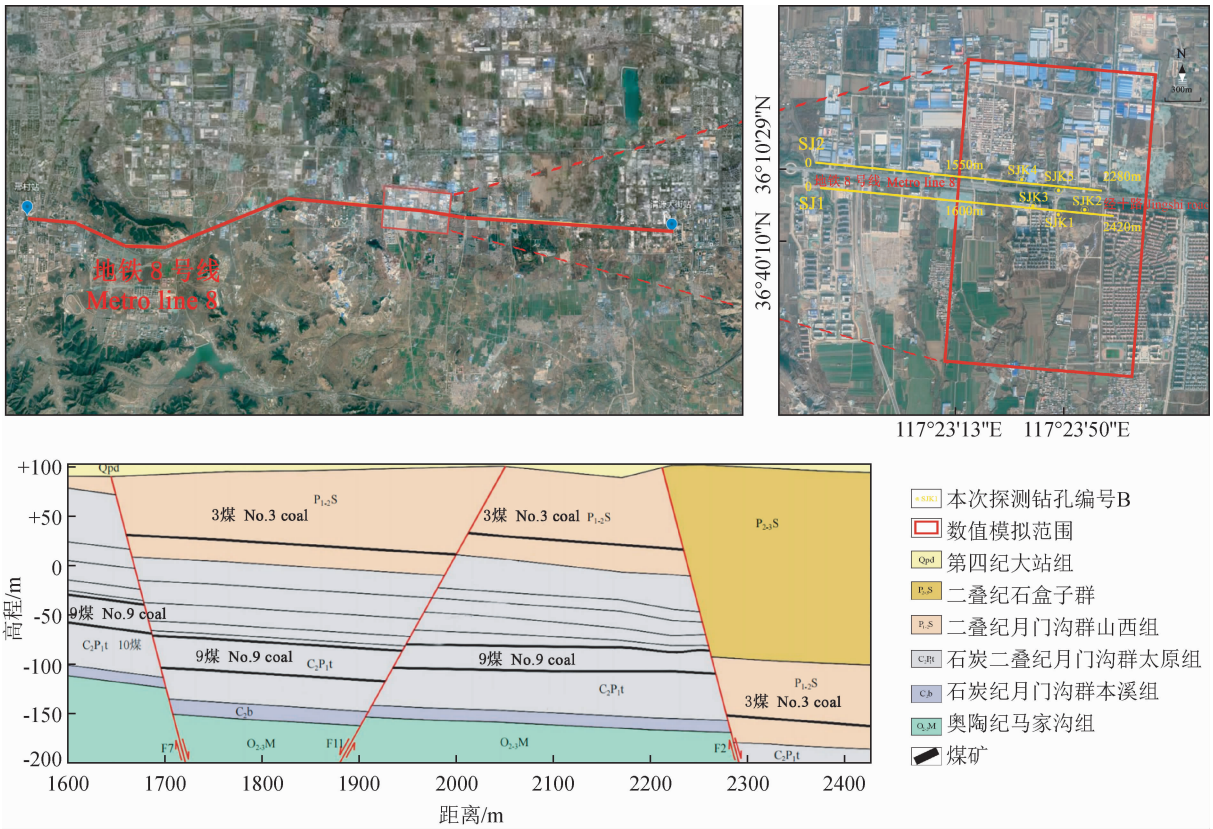


图 1 研究区位置、现场工作布置及地质剖面图

Fig. 1 Location of the study area, field survey layout, and geological cross-sectional diagram

1 研究区概况及采空区探测

1.1 研究区概况

研究区圣井采矿区位于山东省济南市章丘区西部,属于冲洪积平原地貌,地面平坦,地形起伏微小.区域地层 1 由老到新依次为奥陶纪马家沟组,石炭二叠纪本溪组、太原组,二叠纪山西组和第四纪,多条断层穿过研究区.研究区内,丰水期地下水位埋深约 20 m,枯水期则约为 50 m,水位变化幅度达 30 m 左右.研究区内地下水主要有松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙水及碳酸盐岩裂隙岩溶水.研究区地理位置和地质剖面图如图 1 所示.

1.2 采空区探测

根据现场工作条件和探测要求,选用瞬变电磁中心回线装置对充水采空区进行探测(陈江军等,2018;田忠斌等,2022;Yang *et al.*, 2023;姚金等,2023;Xiao *et al.*, 2025;王艳波,2025;Feng *et al.*, 2024;周楠楠等,2023). 探测仪器选用加拿大 phoenix 公司生产的 V8 多功能电法仪,选用 20 m × 20 m 的矩形发射线框,共 3 匝;选用直径为 1 m 的圆形接收线框,共 100 匝.设定发射电流为 10 A;关断时间为 10 ms;50 Hz 频率干扰压制.数据处理采用自行编制的电阻率反演软件(陈卫营等,2024;薛俊杰等,2024;燕帅等,2023;尹雄等,2025).其中 SJ1,SJ2 线探测结果如图 2 所示,由图 2 可以看出,基于 SJ1(1600 ~ 2200 m)与 SJ2(1550 ~ 2100 m)测线视电阻率剖面综合分析,研究区垂向电性结构呈现一致的“高-低-高”三层特征:上部高阻层(高程 55 ~ 75 m,电阻率 85 ~ 105 Ω)对应 3 煤顶板山西组砂泥岩;中部显著低阻层(高程 35 ~ 55 m,电阻率 55 ~ 70 Ω);下部高阻层(高程 -25 ~ 35 m,电阻率 95 ~ 155 Ω)对应 3 煤底板太原组与本溪组砂、粉砂岩.横向视电阻率等值线近似平行,表明地层整体连续性好.两条剖面均识别出多处低阻异常区:SJ1 测线中位于 1600 ~ 1830 m、1860 ~ 2200 m(高程 35 ~ 55 m),SJ2 测线中位于 1560 ~ 1830 m、1860 ~ 2100 m(高程 25 ~ 55 m).这些异常区电阻率显著低于围岩,符合充水采空区的电性响应特征,结合地质资料综合解释为充水采空区.此外,在两条剖面中均发现局部视电阻率降低及等值线下凹现象(SJ1:1800 ~

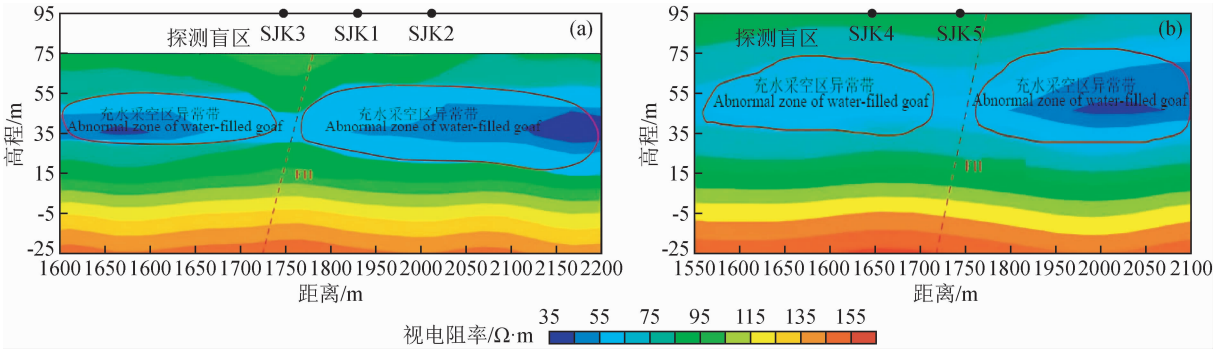


图 2 SJ1、SJ2 线探测电阻率异常剖面

Fig. 2 Resistivity anomaly profiles along survey lines SJ1 and SJ2

1900 m,高程 45 ~ 55 m;SJ2:1800 ~ 1900 m,高程 35 ~ 55 m),推断为同一条断层(F11)的反映,表明该断层在剖面上具有较好的延伸一致性. 为验证探测结果准确性,布设 SJK1 ~ SJK5 五个钻孔作为验证钻孔(钻孔位置如图 1 所示). 5 个钻孔位置,均在高程 36.9 ~ 38.5 m 出现漏水、掉钻、进尺变快、岩心破碎、塌孔、漏浆现象,表明这些钻孔均揭露 3 煤采空区,且采空区存在充水现象. 采空区分布范围和瞬变电磁法展示的低阻异常带相对应,根据探测和钻探结果确定低阻带分布区为充水采空区.

2 沉降变形概率积分法计算分析

基于随机介质理论(计烜等,2025;迟凤妹等,2025),地下煤层开采导致的岩体变形移动可视为无数微小单元离散体的变形过程. 该理论假设覆岩为各向同性的松散介质,单个微小单元开采引起的地表下沉服从正态分布,等同于概率密度的分布. 因此,整个开采区域引起的地表沉降服从线性叠加原理,可通过概率密度函数的积分公式进行计算. 在运用概率积分法进行预测时,参数选取的准确性直接决定计算精度. 依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》,并结合本矿区钻孔揭露的岩土工程地质条件,采用经验类比法与反演法确定预测参数. 考虑到研究区涉及 3 煤与 9 煤的多煤层开采,重复采动会对上覆岩层产生二次扰动,导致岩体结构进一步破坏,从而使下沉系数增大. 确定下沉系数 q 为 0.72,主要影响角正切 $\mathrm{tg}\beta$ 为 2.28,水平移动系数 b 为 0.25,拐点偏移距 S 为 0.26H,开采影响传播角 $\theta 0$ 为 90°~0.6α(煤层倾角). 根据选取的地表变形参数,通过中国矿业大学开发的“矿山开采沉陷预计系统(MSPS)”软件,对 3 煤和 9 煤开采所引起的最大地表变形值分别进行计算,通过 AutoCAD、Grapher 等软件绘制了研究区地表变形等值线图(如图 3),图中包括地表下沉变形、地表水平变形、地表曲率变形和地表倾斜变形等值线.

图 3a 显示研究区东西侧各产生一个地表下沉盆地,西侧地表下沉盆地范围和沉降量较小. 地表变形范围超过采空区范围,最大地表下沉值位于采空区中心,地表下沉值由采空区中心向外逐渐减小. 东侧 3 煤、9 煤开采引起的地表下沉最大值位于采空区交界处,为 864.12 mm. 3 煤和 9 煤的综合平均开采厚度为 2.8 m,最大沉降量为综合开采厚度的 30.86%,3 煤和 9 煤开采引起地表下沉影响面积分别约为 192290 m^2 和 520010 m^2. 与地表下沉变形等值线不同,地表水平变形、曲率变形和倾斜变形等值线主要集中在采空区边界(见图 3b、c、d),说明采空区引发的相应变形主要发生在采空区边界. 水平变形、曲率变形和倾斜变形等值线均在采空区边界呈现椭圆状分布,存在正向变形和负向变形成对出现的现象.

3 沉降变形数值模拟计算分析

概率积分法主要适用于单层煤层引起的沉降计算,在处理多煤层引起的地表沉降时,通常采用单煤层沉降计算,再将结果叠加的方法,这一过程忽略了多层煤层间相互作用对地表沉降的潜在影响. 此外在计算过程中,往往通过经验对计算参数进行赋值,使计算结果与实际情况经常会出现偏差. 本文为评估其探测结果的适用性,采用瞬变电磁法探测数据构建精确三维地质模型,并运用 FLAC3D 进行数值模拟分析. 该三维建模方法能够真实反映复杂地层结构、断层空间分布及多煤层采空区的赋存状态,从

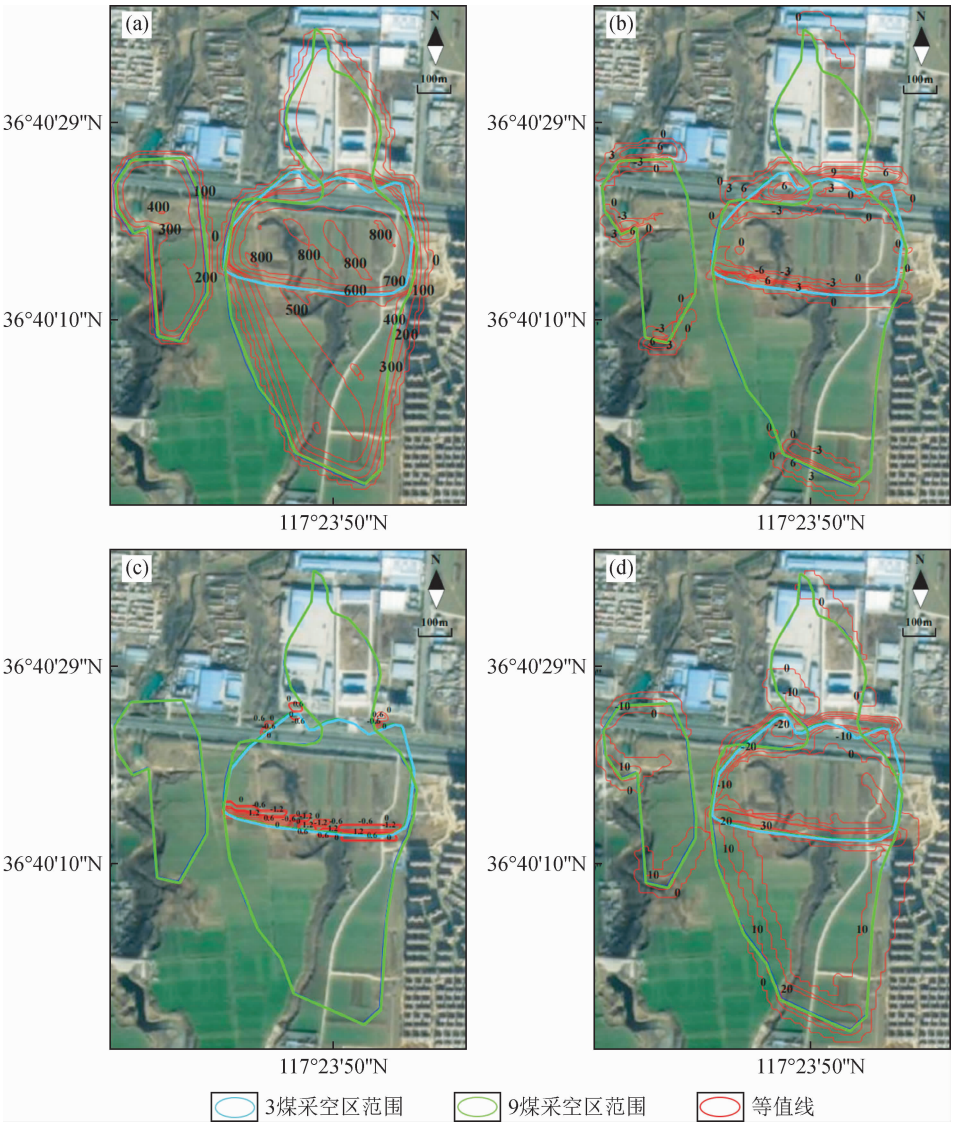


图 3 概率积分法计算地面变形等值线图

(a)地表下沉变形;(b)地表水平变形;(c)地表曲率变形;(d)地表倾斜变形.

Fig. 3 Ground deformation contour maps calculated using the probability integral method

(a) Surface subsidence deformation; (b) Surface horizontal deformation; (c) Surface curvature deformation; (d) Surface tilt deformation.

而在力学机理上刻画多煤层开采的协同变形效应,克服了传统方法中叠加计算的不足.同时,基于现场勘探、室内试验及规范标准确定的岩土力学参数与合理的本构模型(摩尔-库伦),确保了模拟过程的物理真实性与结果可靠性.此外,该数值模型为进一步开展多因素耦合分析提供了平台,本文通过改变地下水埋深,系统研究了地下水因素对地表及地层沉降变形的影响,提升了沉降预测的综合性与科学性.

3.1 三维模型建立

本文采用基于显式拉格朗日差分法的 FLAC3D 软件进行计算(张村等,2025;罗锦等,2022).该方法通过将计算域离散化为 166,667 个六面体网格单元,在每个时步内对运动方程进行积分,能够有效处理材料的非线性大变形.模型激活了大变形模式,以准确刻画采空区坍塌引起的覆岩剧烈位移及断层面的非连续滑动响应.

根据地质勘探资料和钻探资料,研究区域内的岩层按照岩性和完整性划分为松散土层、砂岩岩层、泥岩岩层、粉砂岩岩层和灰岩岩层 5 种岩层类型,自上而下共划分为 22 层岩层.根据前期对采空区进行的勘察可知,研究区域内自上而下共赋存 3、9、10 三

层煤层,主要采煤层为3煤和9煤,因此采空区主要是3煤采空区和9煤采空区.此外,研究区域内存在F2、F7、F11三条断层,断层模拟采用弱化法进行模拟(张雷和何昌荣,2014),断层赋予岩土力学参数时采用弱化材料属性进行赋参,计算模型尺寸为:x方向长为1500 m,y方向长为2400 m,z方向长250 m.根据前期探测结果,设定采空区在3煤和9煤区域,区域内存在F2、F7、F11断层,采用弱化材料属性进行断层赋参.该模型共有6个边界面,其中,地表即上边界面设置为自由界面,不设置位移场约束;前、后、左、右、下边界面为固定边界面,设置水平约束,限制其水平位移;下边界面设置固定约束,限制其水平和竖直位移.重力加速度设置为9.8 m/s^2,方向竖直向下,不施加其他附加应力.模型共划分166667个网格单元,110720个单元节点,三维计算模型如图4所示.

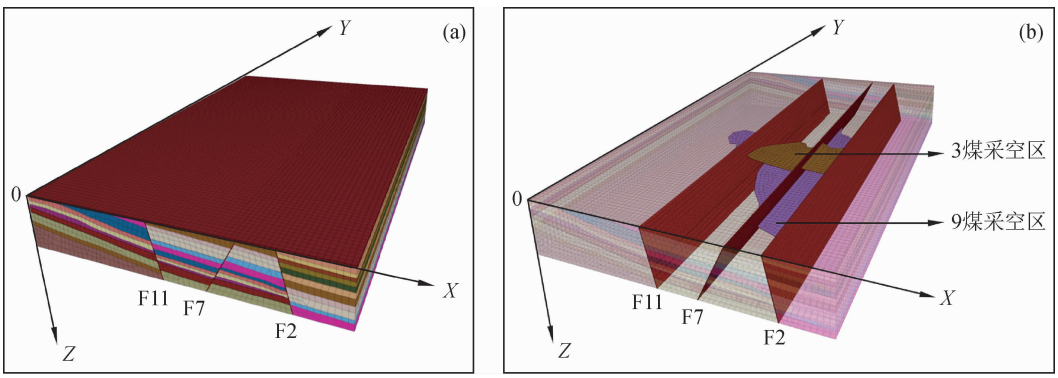


图4 三维计算模型及网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of the 3D computational model and mesh discretization

3.2 本构模型选择与参数设定

假设采空区引起的地表变形符合摩尔库伦屈服准则,选取摩尔库伦模型作为本构模型,采空区部分采用空间模型,表1中的体积模量(K)与剪切模量(G)是FLAC3D摩尔-库伦本构模型的核心输入参数,其与室内试验测得的弹性模量(E)和泊松比(ν)转换关系如下:

$$K=\frac{E}{3(1-2\nu)}, \tag{1}$$

$$G=\frac{E}{2(1+\nu)}, \tag{2}$$

数值模拟中各层岩土体的力学参数如表1所示.

表1 模型所用岩土力学参数

Table 1 Geomechanical parameters of rock and soil used in the numerical model

岩性	密度/(g·cm^{-3})	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
松散土层	1850	0.0382	0.0123	0.012	19.6	0
断层	1870	0.012	0.008	0.056	28	0.08
灰岩1	2350	31.2	18.6	2.48	46.5	2.36
粉砂岩1	2375	22.4	13.4	2.36	43.3	2.14
砂岩1	2346	19.8	11.5	2.14	45.1	2.29
泥岩1	2450	37.6	19.4	2.18	44	1.53
粉砂岩2	2419	21.5	13.2	2.27	43.3	2.19
泥岩2	2460	39.6	18.9	2.18	45.2	1.39
砂岩2	2331	31.5	16.6	2.08	45.6	2.39
泥岩3	2440	38.1	19.3	2.25	45.9	1.61
煤层	1460	7.5	1.45	1.3	29.6	3.02
砂岩3	2419	30.2	12.8	2.23	44.4	2.39

续表 1

Continued Table 1

岩性	密度/(g·cm^{-3})	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
粉砂岩 3	2336	22.2	13.4	2.31	43.6	2.28
砂岩 4	2395	31.3	16.4	2.14	45.5	2.35
粉砂岩 4	2387	22.1	12.7	2.32	42	2.09
砂岩 5	2322	30.9	16.2	2.36	46.2	2.41
泥岩 4	2430	37.8	1.95	2.08	44.6	1.47
砂岩 6	2348	31.2	15.7	2.28	44.3	2.51
粉砂岩 5	2409	23.1	14.1	2.35	43.7	2.19
砂岩 7	2329	31.4	17.1	2.27	46	2.19
粉砂岩 6	2340	21.6	12.1	2.3	40.3	2.26
砂岩 8	2363	31.6	16.2	2.24	45.6	2.31

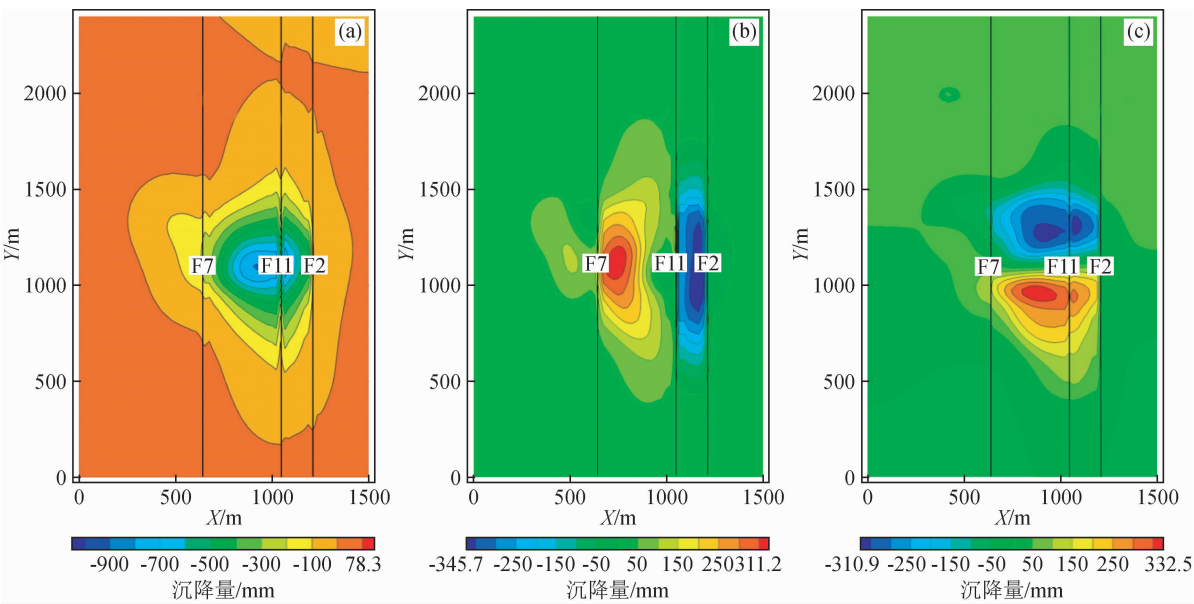


图 5 计算采空区地表变形等值线图

沉降、*X* 方向水平位移、*Y* 方向水平位移.

Fig. 5 Contour maps of calculated surface deformations over the goaf

Subsidence, *X*-direction horizontal displacement, *Y*-direction horizontal displacement.

上述变量基于现场钻探岩芯的室内物理力学试验获得(李海英等,2024),并参考《煤矿井巷工程规范》进行了折减处理.

3.3 模拟计算结果分析

通过 FLAC3D 数值模拟计算,将计算得到的结果导入到 Tecplot 软件中,绘制出研究区域地表变形等值线图,如图 5 所示.

从图 5 中可以看出,地表沉降主要分布在 3 煤和 9 煤采空区范围内,沉降量大于 700 mm,当存在断层时,煤层的开采会使得地表沉降值变大(罗锦等,2022).3 煤和 9 煤开采引起的地表最大沉降值所在点位 *XY* 坐标为(930,1100),该点位于左侧沉降区域,地表最大沉降值为 915.3 mm.3 煤平均开采厚度为 1.3 m,9 煤平均开采厚度为 1.5 m,最大沉降值为煤层开采厚度的 32.69%.此外,地表变形存在正向变形,最大正向变形值为 78.3 mm,这说明由于煤层的开采使得地表产生轻微隆起变形现象.在地表水平变形中,正向位移和负向位移成对出现,由于断层的存在导致断层附近地表水平变形不连续,煤层的开采会使得地表水平变形变大.因此,基

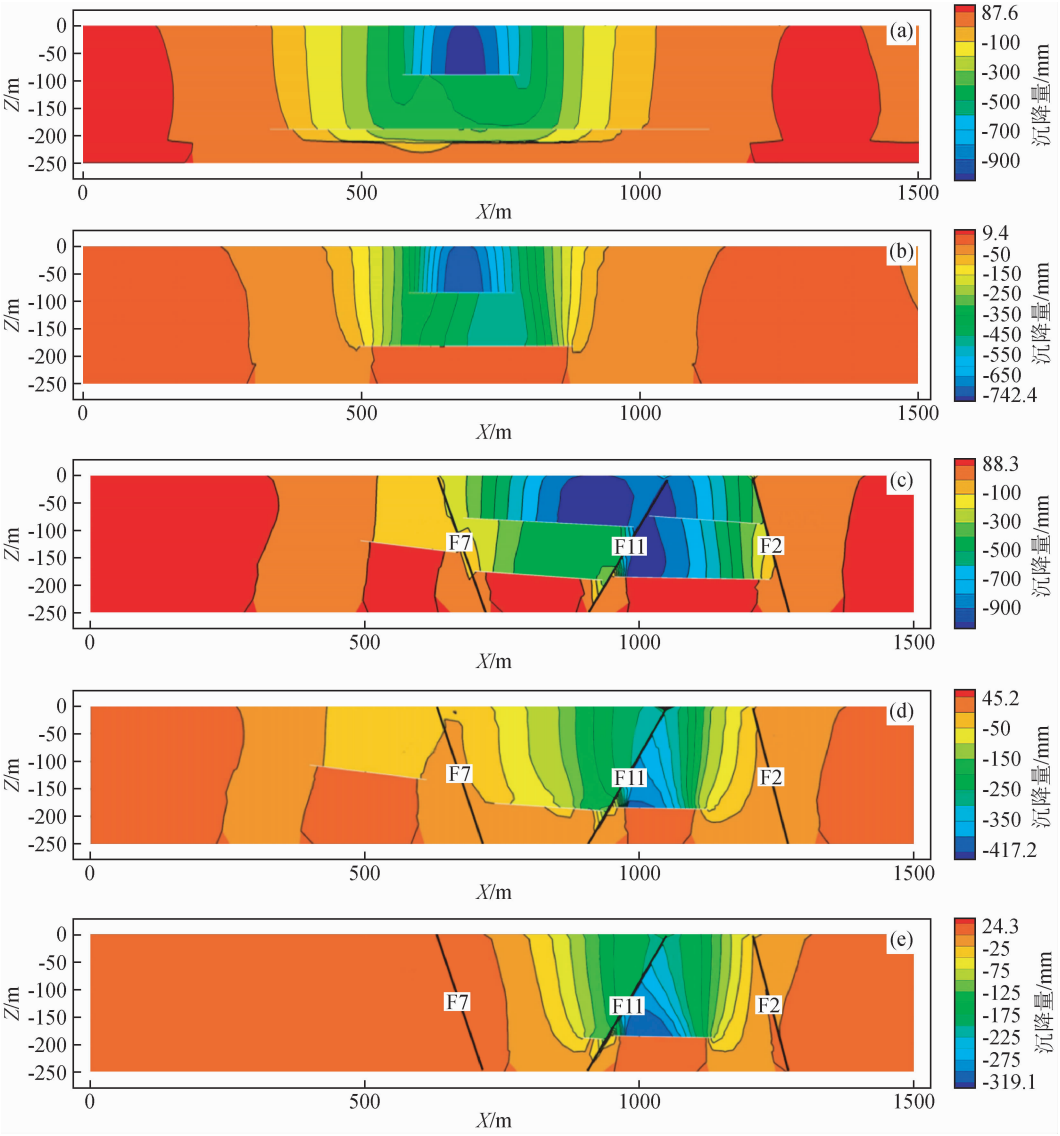


图 6 计算采空区标准断面地层沉降等值线图

自上而下为 $X=930$、$X=800$、$Y=1100$、$Y=1400$、$Y=1600$ 时.

Fig. 6 Contour maps of strata settlement at standard cross-sections of the goaf

From top to bottom: $X=930$, $X=800$, $Y=1100$, $Y=1400$, $Y=1600$.

于数值模拟结果分析,影响地表变形模拟效果的关键因素可归纳为:地质构造(尤其是断层的分布与性质)与开采工程参数(包括采空区范围与煤层开采厚度)共同主导了地表沉降与水平变形的空间格局、不连续性及量值大小. 断层(如 F11、F2)不仅阻隔了变形的连续性,还导致其附近变形梯度显著增大;而开采活动直接决定了沉降盆地的范围与最大沉降量,并引发沉降与水平变形在空间上的耦合响应.

3.4 地层沉降结果分析

为探究采空区上覆岩层沉降变形规律,选取横穿和纵穿地表沉降最大值所在点的剖面和具有决定性意义的剖面,分析不同剖面处地层沉降变形规律.

从图 6 可以看出,煤层开采引起的沉降从煤层顶板传递到地面,沉降等值线在采空区附近较为密集,由于被采空区截断,导致等值线在采空区附近出现不连续现象. 地层最大沉降量主要分布在 F11 断层上盘和下盘、3 煤采空区顶板处,沉降从采空区顶板一直延伸到地表. 当仅存在单层采空区的时候,采空区底板会出现轻微隆起变形,产生向上的位移. 而当存在多层煤层开采的时候,靠近地面的煤层的底板并不会产生轻微隆起变形,这是因为下方煤层

的开采会使得上覆岩层发生较大的沉降变形,导致靠近地面的煤层的底板也产生沉降变形.

沉降等值线在断层附近较为密集,尤其是 F11 断层上下盘附近最为密集,而且采空区顶板在靠近 F11 断层的一侧产生的沉降较大. F11 断层上下盘产生的变形不同,下盘一侧的等值线明显更为密集,表明下盘沉降变形较之上盘更为显著. 在 F11 断层上盘,即采空区底板靠近断层一侧,范围是 $x=910\sim940$ m, $z=10\sim50$ m, 底板产生沉降变形,最大值为 223.4 mm,说明断层导致的采空区沉降超越了煤层开采所引发的隆起变形,因此采空区底板非但不会隆起,反而会呈现沉降态势.

随着采空区范围的变小,沉降量逐渐减小,底鼓量也逐渐减小,采空区顶板在靠近 F11 断层的一侧产生的沉降较大,此时,最大沉降值发生在 F11 断层下盘,即 9 煤采空区顶板处. 较大的沉降区域逐渐从两个变成一个,且范围也逐渐变小.

4 概率积分法和数值模拟法计算结果对比分析

通过概率积分法计算得出的地表最大沉降值是 864.12 mm,与通过数值模拟法计算得出的结果相差 51.18 mm. 两种方法求出的结果存在差异是由于概率积分法未能考虑多煤层的开采以及断层对地表沉降产生的影响. 从概率积分法的数学计算模型就可以看出,此方法适用于连续、分布规则的单一煤层,在处理多采空区引起的地表沉降变形计算时,概率积分法仅限于计算单个煤层的沉降量并进行叠加,未考虑多煤层开采对上覆岩层的重复扰动效应,从而导致地表沉降变形的预测值偏低. 此外,断层的存在也会使得采空区引起的地表沉降变大,数值模拟法在计算过程中考虑了这些情况.

从计算结果中可以看出,概率积分法只能对地表沉降变形进行计算,无法计算地层沉降变形,难以对岩体内部的位移情况和总体岩层的移动趋势进行预测计算,而数值模拟法可以对地表沉降变形和地层沉降变形进行模拟计算,能有效地弥补这个缺陷(Wouters *et al*., 2025;Postolachi *et al*., 2026). 此外,两种方法可以互相验证、补充,通过两种方法相结合能更好地对地表沉降变形进行预测.

5 地下水对沉降变形影响分析

本次模拟根据研究区地下水位实际情况,建立不同地下水位埋深的数值计算模型,研究分析丰水期和枯水期,即地下水位埋深分别为 20 m 和 50 m 时,不同的地下水位高度对地表沉降以及地层沉降变形规律的影响. 在上文模拟的基础上,进行流固耦合计算.

地下水位面分别设定在 $Z=200$ m 和 $Z=230$ m 处,设定地下水位面处为固定孔隙水压力边界,模型内部水压按照水力梯度呈线性增加,模型底面和侧面为不透水边界. 煤层开采区域孔隙水压力固定为 0. 岩土力学参数按照表 1 进行设置. 基于本研究区的详尽资料,并融合过往经验,综合评定了各岩层的渗透系数及孔隙率,具体参见表 2.

表 2 渗流参数表

Table 2 Hydraulic conductivity and seepage parameters

岩性	渗透系数/(m·s^{-1})	孔隙率
松散土层	10^{-8}	0.5
灰岩	10^{-9}	0.5
断层	10^{-10}	0.5
煤层	10^{-11}	0.5
粉砂岩	10^{-12}	0.5
砂岩	10^{-10}	0.5
泥岩	10^{-9}	0.5

通过数值模拟计算之后,将计算结果导入到 Tecplot 中,绘制出研究区不同地下水位条件下的地表变形等值线图,如图 7 所示.

图 7 显示地下水的存在并未显著改变地表沉降的整体分布格局,但沉降量相较于无地下水情况有所增加. 地表上两个主要的沉降区域依旧明显,其范围与无地下水时大致吻合. 当地下水位面在 $Z=200$ 时, 沉降区域内沉降量均大于 900 mm, 地表最大沉降值为 1006.5 mm,为煤层开采厚度的 35.95%. 当地下水位面在 $Z=230$ 时, 沉降区域内沉降量均大于 1100 mm, 地表最大沉降值为 1210.9 mm,为煤层开采厚度的 43.25%. 相较无地下水存在时,地表最大沉降量分别增加了 91.2 mm 和 295.6 mm,分别增长了 9.96% 和 32.3%,这表明,地下水的存在会加剧煤层开采引发的地表沉降(张村等,2025;Carlson *et al*., 2020). 具体来说,地下水位的上升导致孔隙水压力增大,进而增加了岩体所受的总应力,最终促使地表变形加剧.

为探究地下水对采空区上覆岩层沉降变形的影响,分布横穿和纵穿地下水位面在 $Z=200$ 和 $Z=230$ 时的地表沉降最大值所在点的剖面,分析剖面

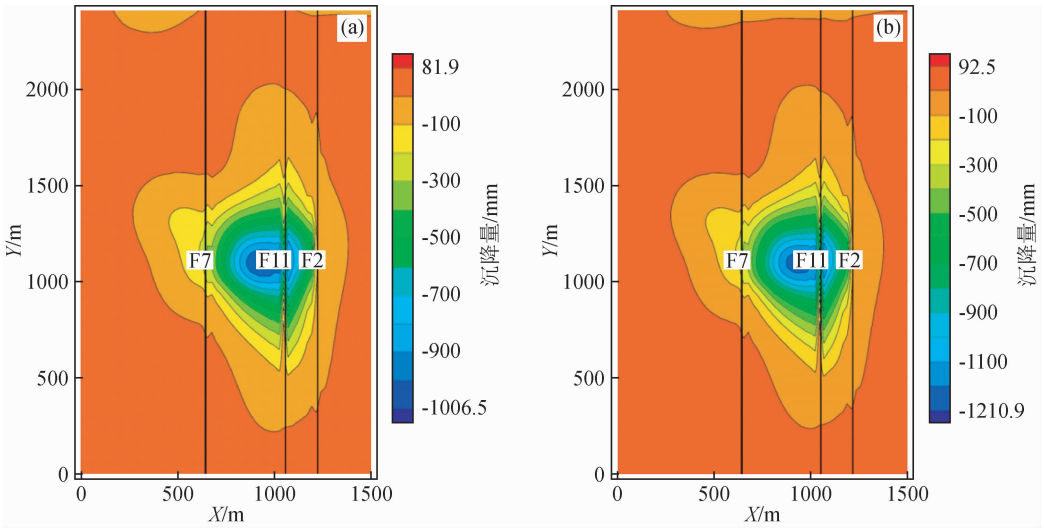


图 7 地下水位面沉降等值线图

Fig. 7 Contour map of groundwater table settlement

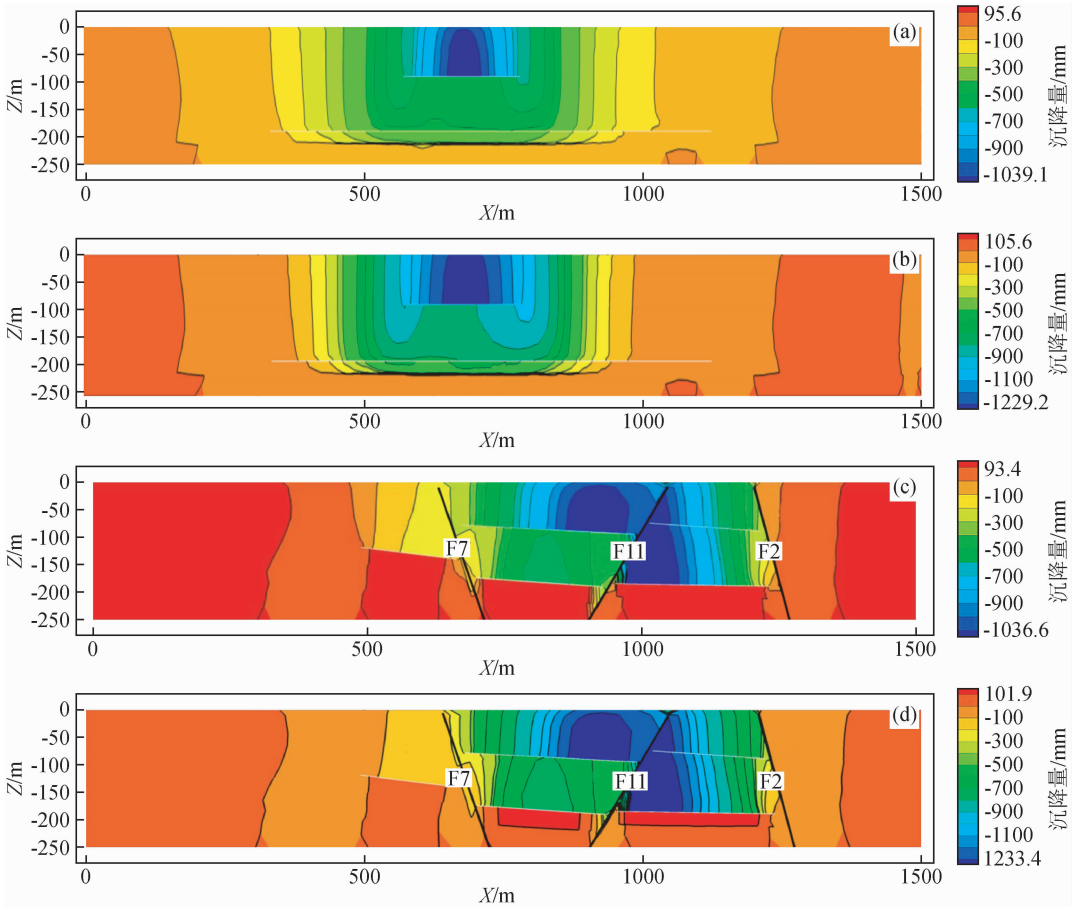


图 8 不同地下水位面时不同位置沉降等值线图

(a) $Z=200$ 时 $X=930$ 剖面;(b) $Z=230$ 时 $X=930$ 剖面;(c) $Z=200$ 时 $Y=1100$ 剖面;(d) $Z=230$ 时 $Y=1100$ 剖面.

Fig. 8 Settlement contour profiles of the groundwater table

(a) Cross-section taken at $X=930$ when $Z=200$; (b) Cross-section taken at $X=930$ when $Z=230$; (c) Cross-section taken at $Y=1100$ when $Z=200$; (d) Cross-section taken at $Y=1100$ when $Z=230$.

处地下水对地层沉降变形的影响.

图 8 显示在不同的地下水位条件下,$X=930$ 剖面处的整体地层沉降变形分布范围几乎不变.根据分层总和法计算,当地下水位面在 $Z=200$ 和 $Z=230$ 时,地层最大沉降量分别为 1039.1 mm 和 1229.2 mm,均位于 3 煤采空区顶板处.在 9 煤采空区,相较于无地下水存在时,底板沉降量增大,地层最大沉降量分别增加了 109.6 mm 和 299.7 mm,分别增长了 11.79% 和 32.24%.由于地下水的存在(张村等,2025),导致孔隙水压力的增加,使得采空区上覆岩层受到的总应力增加,从而使采空区顶板岩层产生的沉降增大,使采空区底板岩层产生地鼓起变形也增大.

6 结 论

(1)在城市地区,通过地球物理方式探测煤炭采空区和断层分布后,可以用概率积分法和数值模拟计算法开展地面沉降计算,该方法在本文探测中得到良好验证.

(2)多煤层开采情况下,概率积分法只能计算单个煤层的沉降量并进行叠加,计算结果偏小.多煤层开采时会对上覆岩层产生重复扰动,使得地表沉降增加,数值模拟计算过程会充分考虑这一过程,计算结果更符合现实.数值模拟法计算发现,单层采空区底板会出现轻微隆起变形,产生向上的位移.而在多层煤层开采的情况下,由于下方煤层的开采导致上覆岩层发生显著沉降,进而使得该煤层底板同样发生沉降变形.

(3)采空区和断层同时存在条件下,靠近断层的采空区顶板沉降现象尤为显著.断层下盘一侧产生的沉降变形大于在断层上盘一侧产生的沉降变形.煤层开采地层受到断层的影响,使得采空区沉降程度超过开采引起的隆起变形,因此,即使是下方采空区底板也不会发生隆起变形,而是发生沉降变形.

(4)地下水的存在加剧煤层开采引发的地表和地层沉降,增幅高达 32.3%.这是由于地下水位的上涨,导致孔隙水压力的增加,使得岩体受到的总应力增加,导致地表变形和地层变形增加.

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Carlson G, Shirzaei M, Ojha C, *et al*. 2020. Subsidence-derived volumetric strain models for mapping extensional fissures and constraining rock mechanical properties in the San Joaquin Valley, California. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(9): e2020JB019980, doi: 10.1029/2020JB019980.

Chen J J, Liu B, Wang P L, *et al*. 2018. Application research of integrated geophysical exploration techniques to gypsum mine gob. Progress in Geophysics (in Chinese), 33(2): 783-789, doi: 10.6038/pg2018BB0086.

Chen W Y, Song W T, Xue G Q, *et al*. 2024. 3D electric model and short-offset transient electromagnetic forward modeling analysis of the main and east mines of Bayan Obo deposit, Inner Mongolia. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(10): 3931-3945, doi: 10.6038/cjg2024R0893.

Chi F M, Liu G L, Tao Q X, *et al*. 2025. Subsidence monitoring and analysis of Yuncheng coal mine combined with SBAS-InSAR and probability integral model. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(2): 484-494, doi: 10.6038/pg2025II0002.

Feng Q C, Li C, Hao S R, *et al*. 2024. Hydrogeological investigation of a goaf and subsidence area based on a ground-to-air transient electromagnetic sounding method. Water, 16(7): 1067, doi: 10.3390/w16071067.

Ji X, Xu M J, Zhang C L, *et al*. 2025. Stability analysis of high voltage transmission lines based on probability integral method. Advances in Geosciences (in Chinese), 15(2): 195-205, doi: 10.12677/ag.2025.152021.

Li H Y, Liu J, Gong W, *et al*. 2024. Characterizing seismic elastic properties of deep cavity-fracture carbonate reservoir using digital rock physics. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(2): 716-726, doi: 10.6038/pg2024HH0134.

Luo J, Guo Q B, Chen H K, *et al*. 2022. Experimental simulation study on abnormal response of surface subsidence caused by mining in footwall of reverse fault. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(3): 1280-1291, doi: 10.6038/pg2022FF0334.

Postolachi B, Onica I, Toderaş M, *et al*. 2026. Long-term subsidence forecasting for the Slănic Prahova salt mine using numerical creep modeling and field monitoring up to 2050. Applied Sciences, 16(5): 2271, doi: 10.3390/app16052271.

Tian Z B, Ma Y L, Li X, *et al*. 2022. A method for detecting coalbed methane gas storage structure in coal goaf——A case in Qinshui coal field in Shanxi province. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(11): 4495-4503, doi: 10.6038/cjg2022P0799.

Wang Y B. 2025. Application characteristics and effects of mine TEM in optimized detection of goafs. Coal Technology (in Chinese), 44(9): 120-123, doi: 10.13301/j.cnki.ct.2025.09.025.

Wei D N, Wang S J. 2024. Settlement monitoring and analysis along Xi'an metro line based on time series InSAR technology. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(2): 498-509, doi: 10.6038/pg2024HH0198.

Wouters M C, Govers R, Hanssen R F. 2025. Development of an efficient model to calculate subsidence above the Groningen gas field. Netherlands Journal of Geosciences, 104: e12151, doi: 10.70712/njg.v104.12151.

Xiao J, Han S L, Duan X Z, *et al*. 2025. Coal mine hidden disaster detection based on opposing coils transient electromagnetic method. Lithosphere, 2025(1): lithosphere_2024_210, doi: 10.2113/2025/lithosphere_2024_210.

Xue J J, Cheng J L, Han Y C. 2024. Full waveform inversion for the borehole transient electromagnetic pseudo seismic data. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(9): 3630-3639, doi: 10.6038/cjg2024R0798.

Yan S, Yin C C, Su Y, *et al*. 2023. Fast imaging of transient electromagnetic data based on convolutional neural network. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(10): 4290-4300, doi: 10.6038/cjg2023Q0827.

Yang H, Cheng W S, Qi Z P, *et al*. 2023. Goaf area detection using high-precision wavefield imaging method of ground-airborne transient electromagnetics. Journal of Geophysics and Engineering, 20(3): 538-548, doi: 10.1093/jge/gxad028.

Yao J, Xu P F, Ling S Q, *et al*. 2023. Research on microtremor profile

method to detection of goaf along subway line: A case study in the second phase of subway line 14. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(10): 4279-4289, doi: 10.6038/cjg2022Q0926.

Yin X, Wang Z X, Zhang J L, *et al*. 2025. Aerodynamic modeling simulation and design of coaxial suspension structure for airborne transient electromagnetic detection system. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 68(12): 4817-4834, doi: 10.6038/cjg2025T0191.

Zhang C, Huang X H, Wang Y L, *et al*. 2025. Simulation method and engineering application of fluid solid coupling for water immersion weakening in coal mining. Coal Science and Technology (in Chinese), 53(6): 407-417, doi: 10.12438/cst.2024-0383.

Zhang L, He C R. 2014. Frictional properties of clay minerals and their effect on fault behavior. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(2): 620-629, doi: 10.6038/pg20140220.

Zhou N N, Wei X H, Zhang S. 2023. Analysis on response characteristics and detectability of transient electromagnetic transverse magnetic field. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(9): 3914-3927, doi: 10.6038/cjg2023R0031.

附中文参考文献

陈江军, 刘波, 王鹏来, 等. 2018. 综合物探方法在石膏矿采空区探测中的应用研究. 地球物理学进展, 33(2): 783-789, doi: 10.6038/pg2018BB0086.

陈卫营, 宋婉婷, 薛国强, 等. 2024. 内蒙古白云鄂博主东矿三维地电模型与短偏移距瞬变电磁三维正演分析. 地球物理学报, 67(10): 3931-3945, doi: 10.6038/cjg2024R0893.

迟凤妹, 刘国林, 陶秋香, 等. 2025. 联合 SBAS-InSAR 与概率积分模型的郭城煤矿沉降监测与分析. 地球物理学进展, 40(2): 484-494, doi: 10.6038/pg2025II0002.

计烜, 许明镜, 张晨亮, 等. 2025. 基于概率积分法对高压输电线路稳定性分析. 地球科学前沿, 15(2): 195-205, doi: 10.12677/ag.2025.152021.

李海英, 刘军, 龚伟, 等. 2024. 基于数字岩石物理的深层缝洞型碳酸盐岩储层地震弹性特征表征. 地球物理学进展, 39(2): 716-726, doi: 10.6038/pg2024HH0134.

罗锦, 郭庆彪, 陈红凯, 等. 2022. 逆断层下盘开采地表沉陷异常响应实验模拟研究. 地球物理学进展, 37(3): 1280-1291, doi: 10.6038/pg2022FF0334.

田忠斌, 马玉龙, 李貅, 等. 2022. 煤层采空区内煤层气储气构造半航空瞬变电磁探测——以沁水煤田为例. 地球物理学报, 65(11): 4495-4503, doi: 10.6038/cjg2022P0799.

王艳波. 2025. 矿井瞬变电磁法在采空区优化探测中的应用特点和效果. 煤炭技术, 44(9): 120-123, doi: 10.13301/j.cnki.ct.2025.09.025.

卫达宁, 王世杰. 2024. 基于时序 InSAR 技术的西安地铁沿线沉降监测及预测分析. 地球物理学进展, 39(2): 498-509, doi: 10.6038/pg2024HH0198.

薛俊杰, 程久龙, 韩杨春. 2024. 钻孔瞬变电磁法拟地震全波形反演. 地球物理学报, 67(9): 3630-3639, doi: 10.6038/cjg2024R0798.

燕帅, 殷长春, 苏扬, 等. 2023. 基于卷积神经网络的瞬变电磁数据快速成像算法研究. 地球物理学报, 66(10): 4290-4300, doi: 10.6038/cjg2023Q0827.

姚金, 徐佩芬, 凌甦群, 等. 2023. 地铁线路采空区微动剖面法探测研究——以广州地铁 14 号线二期为例. 地球物理学报, 66(10): 4279-4289, doi: 10.6038/cjg2022Q0926.

尹雄, 王中兴, 张钧琳, 等. 2025. 航空瞬变电磁探测系统共中心式吊挂结构气动力学建模仿真与设计. 地球物理学报, 68(12): 4817-4834, doi: 10.6038/cjg2025T0191.

张村, 黄玄皓, 王永乐, 等. 2025. 煤矿开采水浸弱化流固耦合模拟方法与工程应用. 煤炭科学技术, 53(6): 407-417, doi: 10.12438/cst.2024-0383.

张雷, 何昌荣. 2014. 黏土矿物的摩擦滑动特性及对断层力学性质的影响. 地球物理学进展, 29(2): 620-629, doi: 10.6038/pg20140220.

周楠楠, 魏新昊, 张顺. 2023. 瞬变电磁横磁场响应特征与探测能力分析. 地球物理学报, 66(9): 3914-3927, doi: 10.6038/cjg2023R0031.