

## 广州南沙区地面沉降分布特征及成因

刘震林, 王莹, 柯小兵, 罗锡宜

### Distribution characteristics and causes of land subsidence in Nansha District, Guangzhou

LIU Zhenlin, WANG Ying, KE Xiaobing, and LUO Xiyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202108023>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 珠江三角洲平原区地面沉降影响因素分析

#{suggestArticle.titleEn}

王双, 严学新, 揭江, 杨天亮, 吴建中, 王红珊 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(5): 98-104

#### 江苏盐城地面沉降风险评价

#{suggestArticle.titleEn}

顾晟彦, 姚维军, 徐明钻, 王丹 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(1): 36-43

#### 安徽阜阳中心城区地面沉降灾害风险评价

#{suggestArticle.titleEn}

王齐鑫, 王龙平, 王泽宇 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(4): 32-39

#### 应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究

#{suggestArticle.titleEn}

石鹏远, 余洁, 朱琳, 王彦兵 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 101-112

#### 基于灰色Verhulst模型的山西太原地面沉降趋势分析

#{suggestArticle.titleEn}

周艳萍 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(2): 94-99

#### 广州市白云区夏茅村岩溶地面塌陷特征及致灾因素和风险分析

Karst collapse characteristics, disaster factors and risk analysis in Xiamao Village, Baiyun District, Guangzhou City

周心经, 郭宇, 郑小战, 李晶晶, 张俊岭, 朱照宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 63-71



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202108023

刘震林, 王莹, 柯小兵, 等. 广州南沙区地面沉降分布特征及成因 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 49-57.

LIU Zhenlin, WANG Ying, KE Xiaobing, et al. Distribution characteristics and causes of land subsidence in Nansha District, Guangzhou [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 49-57.

## 广州南沙区地面沉降分布特征及成因

刘震林<sup>1,2,3</sup>, 王莹<sup>4</sup>, 柯小兵<sup>4</sup>, 罗锡宜<sup>5</sup>

(1. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074; 4. 广东省地质环境监测总站, 广东广州 510510; 5. 佛山市地质局, 广东佛山 528099)

**摘要:** 广州南沙区地面沉降已经影响到城市发展和人民生命财产安全, 为了制定科学有效的措施防止地面沉降进一步发展, 文中基于 InSAR 监测数据和水准监测数据, 总结分析了地面沉降分布特征, 地表形变多为小范围的、局部地区的剧烈沉降。在此基础上, 针对 6 个沉降严重区域, 采用机理模型定量估算了各因素引起的地面沉降量及所占比重, 得可压缩土层引起的沉降量为 34.43 ~ 96.97 mm/a, 所占比重在 37.07% ~ 75.67%, 地下水水位和地面荷载的最大影响比重分别为 26.28% 和 52.40%。并且通过研究分析地面沉降主要因素及影响程度, 为科学防治该地区地面沉降提供科学依据。

**关键词:** 南沙区; 地面沉降; PS-InSAR; 地下水开采; 建筑荷载

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0049-09

## Distribution characteristics and causes of land subsidence in Nansha District, Guangzhou

LIU Zhenlin<sup>1,2,3</sup>, WANG Ying<sup>4</sup>, KE Xiaobing<sup>4</sup>, LUO Xiyi<sup>5</sup>

(1. Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266071, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 4. Guangdong General Geological Environment Monitoring Station, Guangzhou, Guangdong 510510, China; 5. Foshan Geological Bureau, Foshan, Guangdong 528099, China)

**Abstract:** Land subsidence in Nansha District has affected urban development and the safety of people's lives and properties. In order to formulate scientific and effective measures to prevent the further development of land subsidence, this paper summarizes and analyzes the distribution characteristics of land subsidence based on InSAR monitoring data and level monitoring data, the surface deformation is mostly severe settlement in a small and local area. On this basis, for 6 areas with subsidence. The mechanism model is used to quantitatively estimate the amount of land subsidence caused by each factor and its proportion. The subsidence caused by the compressible soil layer was 34.43–96.97 mm/a, the proportion is between 37.07% and 75.67%, and the largest influence proportions of groundwater level and ground load are 26.28% and 52.40%. And through research and analysis of the main factors and impact of land subsidence, this paper provide a scientific basis for scientific

收稿日期: 2021-08-24; 修订日期: 2022-11-01

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 粤港澳大湾区地面沉降监测广州市南沙区试点项目(190Z13003291); 基于地学大数据的城市水资源环境系统时空透视与智能管控(U1911205)

第一作者: 刘震林(1997-), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害和地下水数值模拟方面研究。

E-mail: lz11341144100@163.com

通讯作者: 王莹(1985-), 女, 安徽芜湖人, 高级工程师, 主要从事地下水及其环境地质问题研究。E-mail: wymail5@163.com

prevention and control of land subsidence in this area.

**Keywords:** Nansha District; land subsidence; PS-InSAR; groundwater exploitation; building load

## 0 引言

地面沉降是指在自然或人为因素作用下,地壳表层土体压缩而使得地面标高降低的一种区域性环境地质现象<sup>[1-2]</sup>,威胁着人民生活、经济发展和城市的开发建设<sup>[3]</sup>。发生地面沉降的原因有:新构造活动产生的构造沉降,软土层的压密,人类活动中过量开采地下水、天然气和石油,以及工程施工造成的土体变形等<sup>[4]</sup>。

政府部门和科学人员一直重视地面沉降灾害,无论是在机理、监测还是预测,对地面沉降的研究都很深入,已经可以对其进行定量估算。王伟等<sup>[5]</sup>利用 GNSS 监测技术建立 CORS 网进行连续观测,对地面稳定性的变化进行定量分析,成果可为区域规划和地质灾害防治提供技术支持。陈立国等<sup>[6]</sup>发现次固结系数与超载增量比呈线性递减关系,得到次固结沉降计算公式。基于基坑降水诱发地面沉降机理分析,可以获得明挖基坑地表沉降预测经验参数,并对地面沉降进行简化计算<sup>[7-8]</sup>。总的来说,软土固结、荷载力作用以及开采和排放地下水等是大多数软土地区地面沉降的主要诱因。提前发现和有效判定重大地质灾害的潜在威胁并做好防控,是地质灾害防治工作的重中之重<sup>[9]</sup>。

最近几年的监测数据显示,广州市南沙区地面沉降发展趋势不断增强。已经引起有关部门的重视,开展了一些监测研究工作:吴龙飞等<sup>[10]</sup>根据欧空局(ESA)提供的 InSAR 沉降监测数据,采用振幅离差指数阈值法获取 PS 点,在 ArcGIS 中对所有 PS 点进行分析,获得沉降速率分布情况及年平均沉降速率。陈玉林等<sup>[11]</sup>通过三种不同的基准点方案进行数据处理,即采用区域滤波方法去除共模误差得到稳定性较强的基准点,并以周坐标的重复性(WRMS)作为评价指标,最后与水准测量数据进行对比分析。高磊等<sup>[12]</sup>对构建的地面沉降自动化监测网络数据进行采集整理,得到南沙区累计沉降量;张德波<sup>[13]</sup>引入层次分析—综合指数模型,通过 MAPGIS 空间叠加功能得到南沙区地面沉降易发性分布情况;陈小月<sup>[14]</sup>和陈运坤等<sup>[15]</sup>对南沙区软土分布及特征进行分析,发现南沙区软土厚度和地面沉降速率整体上成正相关,并就此对城市防灾减灾提出合理建议。目前,针对南沙区地面沉降的研究主要集中在地面沉降观测数据的处理方法、地面沉降成因中软土厚度和分布及成因的简单分析,而没有考虑软土固结变形、荷载作用以及

地下水的影响等因素对地面沉降影响的量化研究。

本文旨在对南沙区地质条件进行分析的基础上,结合地面沉降监测数据,研究该区地面沉降时空演化规律及成因,从机理上分析计算各因素对地面沉降的影响程度,为该区地面沉降防治提供技术服务。

## 1 研究区地质概况

研究区及附近地势总体上向南东倾斜,地貌多为三角洲平原,还有低山、丘陵分布在三角洲前缘及西北部地带,中部则是低丘及台地,平原上河流交错纵横,水塘零散分布(图 1)。平原上地面平坦开阔,地势低洼,地面标高-0.2~0.7 m 的低平原约占三角洲面积的 76%。南部为海岸带,是区内海陆相互作用最强烈的地带,具有海岸线长、海岸曲折和岛屿众多的特点。

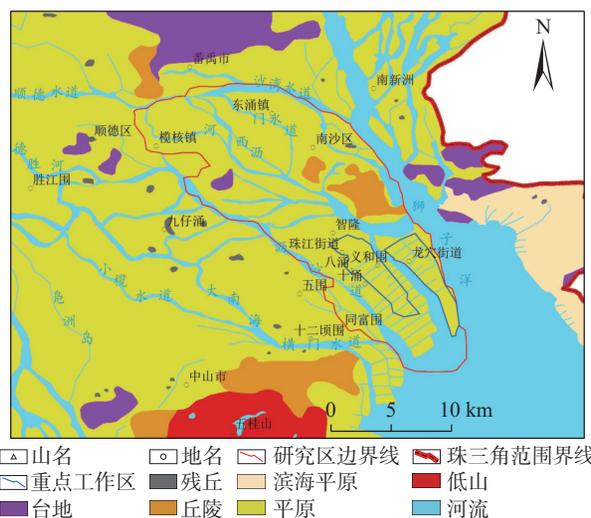


图 1 研究区及周边地形地貌图

Fig. 1 Topography of research area and surrounding area

研究区松散岩类是第四系更新统、全新统冲积层、冲洪积层,海陆交互相及海积层。更新统以冲积相为主,岩性由砂卵石、砂、粉质黏土、黏土等组成;全新统多为海河混合相,前缘以海相为主;河谷平原及山前地带则为冲积相及冲洪积相,主要由黏土或粉土组成。岩土体主要土层和岩石垂向上分布情况见表 1—2。

地下水类型主要为松散岩类孔隙水,其次是基岩裂隙水。含水层一般为砂、砂卵石,厚度 4.04~15.84 m,局部地区达 21.38~36.36 m,富水性一般,局部地区较为丰富;地下水位埋深为 0.02~3.58 m,局部地区高出

表 1 土工工程地质单元分类

Table 1 Classification of soil engineering geological units

土体类型	岩性类型	
黏性土	黏性土、粉质黏土	
粉土	粉土	
砂土	粉砂、细砂、中砂、粗砂、砾砂	
碎石土	圆砾、角砾、卵石、碎石	
特殊类土	残坡积土	黏性土、砂质黏性土、砾质黏性土
	人工填土	粉土
	淤泥类土	素填土、杂填土、冲填土 淤泥质砂土、淤泥质土、淤泥

表 2 岩体工程地质岩性组分类

Table 2 Classification of engineering geological lithologic group of rock mass

岩性组	岩性综合体	岩性类型
侵入岩岩性组	花岗岩、闪长岩综合体	似斑状黑云母二长花岗岩, 细粒花岗岩, 细粒细斑状黑云母二长花岗岩, 花岗闪长岩, 片麻状花岗岩, 伟晶岩
混合岩、片麻岩岩性组	混合岩综合体 片麻岩综合体	花岗混合岩, 混合岩 花岗片麻岩, 片麻岩
含膏盐红层碎屑岩岩性组	-	砾岩, 砂砾岩, 粉—细砂岩, 细砂岩, 含砾中—粗砂岩, 泥岩, 泥质粉砂岩, 灰岩, 泥灰岩, 灰质泥岩, 凝灰岩

地表 0.05 ~ 0.43 m, 年变化幅度小于 3 m。基岩裂隙水包括红层裂隙水、块状岩类裂隙水, 单井涌水量为 12 ~ 272 m<sup>3</sup>/d。

地下水补给来源主要包括大气降雨入渗补给、地表水(含灌溉渗漏)入渗补给以及侧向径流补给三个方面。地下水总体上由北西向南东流, 水力坡度不大, 径流方式主要为水平循环。

地下水排泄方式有潜流排泄、向河流排泄、蒸发和植物蒸腾排泄。区内低山丘陵大都以泉的方式向附近沟谷排泄补给地表水; 在平原和丘陵的交接地带, 第四系孔隙水接受来自基岩裂隙水的侧向补给或地下潜流补给; 位于平原区的地下水水位较浅, 地下水排泄以蒸发和侧向补给河水为主。

## 2 地面沉降分布特征

### 2.1 数据来源

数据来源主要有 InSAR 监测数据和水准监测数据, 广东省地质测绘院于 2019 年 9—10 月开展了广州市南沙区约 800 km<sup>2</sup> 范围的地面沉降 InSAR 监测工作, 获取了南沙区 2018 年 1 月—2019 年 10 月的地表形变速率, 得出广州市南沙区多个重点沉降区域的长时序、大范围地表形变监测结果, 揭示了近年来重点区域的地

表沉降状况。本次获取了覆盖南沙区的 60 景 Sentinel-1 SAR 影像数据如表 3 所示。

表 3 收集到的珠江三角洲地区 Sentinel-1 数据

Table 3 The collection of sentinel-1 data of pearl river delta

模式	入射角/(°)	分辨率	幅宽/km
条带成像	20 ~ 45	5 m×5 m	80
干涉成像	29 ~ 46	5 m×20 m	250
超幅宽	19 ~ 47	5 m×40 m	400
波浪	22 ~ 35, 35 ~ 38	5 m×5 m	20×20

水准监测路线为 1 个闭合环路线以及 2 条附合水准路线, 共 41 个点。其中 XJC001—XJC015 为埋石监测点, 后经调查发现, S111 省道及万顷沙镇南面房屋沉降较大, 因此在这些位置加密水准监测点, 其中 XJC016、XJC018、XJC019 为墙脚标, XJC017 为已有的水闸水准监测点, XJC020、XJC021、XJC022、XJC023 为临时监测道路的道路水准标。布设好的水准监测点闭合环位置如图 2 所示, 两条附合水准路线如图 3 所示。

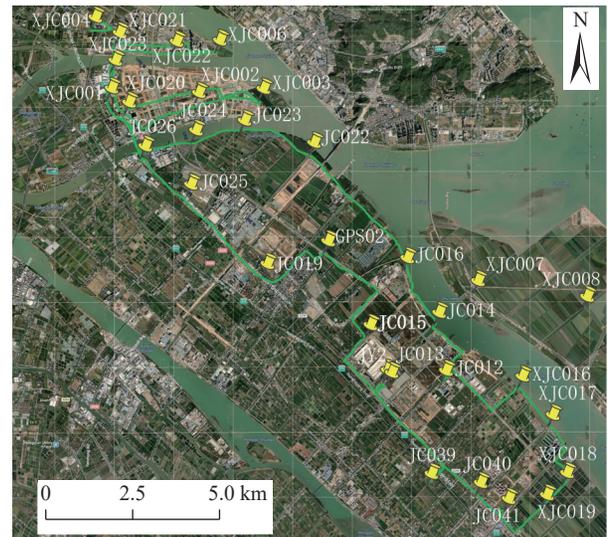


图 2 万顷沙横沥监测点位及路线

Fig. 2 Monitoring points and route of Wanshengsha Hengli

### 2.2 地面沉降分布特征及演化规律

经过外业概算和平差计算对数据网进行处理, 再根据测段距离反向配赋平差, 以平差的结果作为最终成果, 计算所得的数据精度可靠。

部分监测点监测初期(2012—2013 年)和监测末期(2019 年 10 月)的累计沉降量的曲线见图 4, 监测时期内的年平均沉降速率见图 5。

从图 5 中可以明显看出 JC014 号点沉降严重, 年平均沉降量达到了 42.7 mm。另外, JC012、JC019、JC040 自有监测数据以来, 沉降量超过 100 mm, 且年平均沉

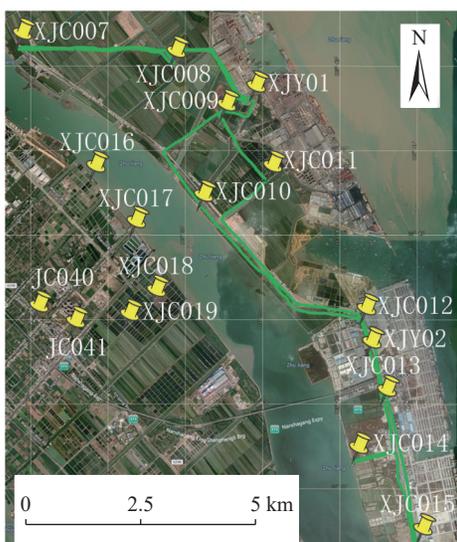


图 3 两条附合水准路线(XJY01—XJY02、XJY02—XJY01)

Fig. 3 Two attached leveling lines (XJY01—XJY02, XJY02—XJY01)

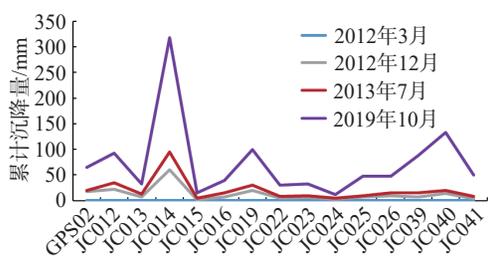


图 4 沉降量曲线图

Fig. 4 Settlement curve

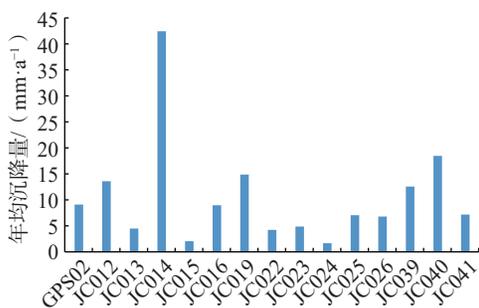


图 5 年平均沉降量柱状图

Fig. 5 Bar chart of annual average settlement

降量超 10 mm/a。对比发现,通过水准点监测的成果和 InSAR 监测成果基本吻合。

根据广州市南沙区 2015—2019 年历年地表形变速率图(图 6),研究区内地面沉降随着时间呈现阶段性发展。

数据表明,2015 年研究区内地面沉降主要分布在南沙明珠湾开发区和龙穴街道出海口养殖场区域,其最大年平均沉降速率超过 30 mm/a,局部超过 40 mm/a;2016 年研究区内地面沉降主要分布在龙穴街道出海

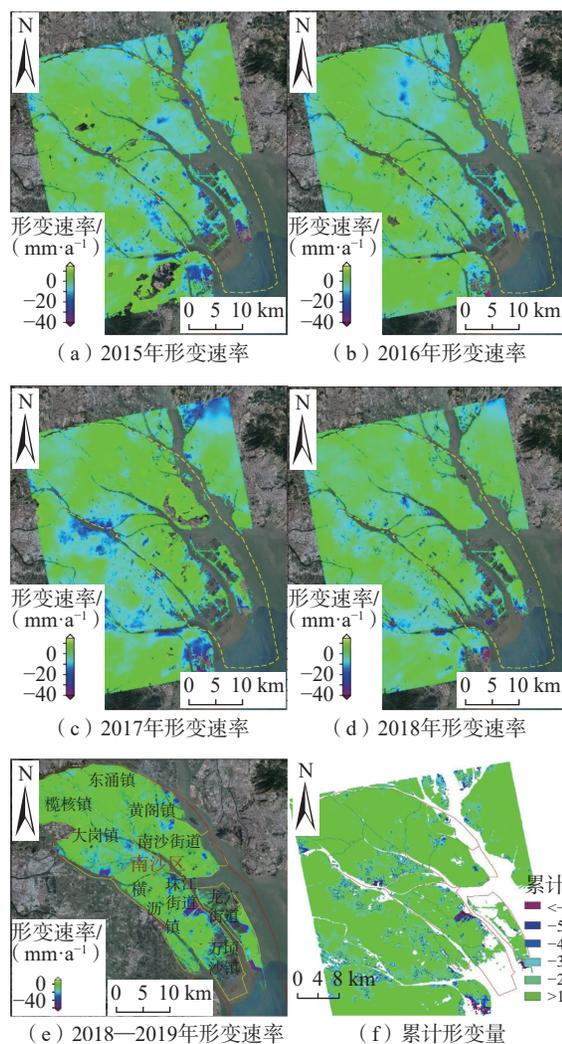


图 6 南沙区 2015—2019 年地表形变速率图

Fig. 6 Surface deformation rate of Nansha District over the years from 2015 to 2019

口养殖场区域,见图 6(e),其最大年平均沉降速率超过 20 mm/a;2017 年研究区内地面沉降主要分布在龙穴街道出海口养殖场区域、珠江街道八涌和十涌之间的义和围村工地区域、南沙明珠湾开发区,其最大年平均沉降速率超过 20 mm/a;2018 年研究区内地面沉降主要分布在龙穴街道出海口养殖场区域、南沙明珠湾开发区,其最大年平均沉降速率超过 30 mm/a;2019 年研究区内地面沉降主要分布在龙穴街道出海口养殖场区域、珠江街八涌和十涌之间的义和围村工地区域、珠江街道周边区域和南沙明珠湾开发区,其最大年平均沉降速率超过 40 mm/a,局部超过 60 mm/a。受施工建设的影响,2015 年南沙街道中部、2016 年东涌镇东部及南部突然出现较大范围的沉降,见图 6(e),并且高层建构物大都采用钻孔灌注桩或静压式预制桩,监测后期基本无沉降。

对监测范围内形变量级较大、范围较广的区域初步分析其成因, 得到 InSAR 监测成果及其原因(表 4)。

表 4 InSAR 监测成果及其原因分析  
Table 4 InSAR monitoring results and cause analysis

年份	具体原因分析	综合分析
2015	万顷沙镇红港村围垦区域主要受软土固结作用, 南沙街道推位村、地铁4号线锦州站附近受荷载影响较为严重	监测时期内均存在沉降的新垦镇、珠江出海口前沿的养殖区域主要受软土固结等地质条件影响, 拟开发建设用地的工程施工及城镇内的建筑设施都会造成地表形变, 并且分布在江河沿岸的大部分形变较大沉降点及其外围区域, 在一个水文年内受地下水水位变动影响, 珠江街道均和围村工地、黄阁村沙仔村施工区域的则主要受可压缩土层影响
2016	仅在该年发生的东涌镇、鱼窝头镇、万洲村一带受施工建筑影响, 沉降的形变区域较大	
2017	沿西南江边分部的养殖场附近受地下水影响发生沉降, 大岗镇施工区域受建筑荷载较为严重	
2018	南沙街道环市中大道中、金沙路和市南大道三路环绕区域受地面荷载和地下水水位的共同影响	
2018—2019	大岗镇庙青村围和珠江街道智隆村的围垦区域、及南沙区中东部城镇建筑区域主要受地面荷载及可压缩土层的影响, 少部分区域受地下水水位影响, 珠江街道均和围村工地、黄阁村沙仔村施工区域的则主要受可压缩土层影响	

### 3 地面沉降影响因素的贡献量估算

研究区的地面沉降主要受三个因素的影响, 分别是可压缩土层、地下水水位、复杂人类活动, 为了分析各因素对地面沉降的影响大小, 下面定量估算各因素引起的地面沉降量。

#### 3.1 土层固结及固结量的计算分析

可压缩土层是南沙区地面沉降形成的地质条件, 包括填土厚度、软土厚度与顶板埋深以及空间分布情况。并且很多新近填土没有进行压密, 会发生较大的自重压密固结作用; 南沙区的新垦、横沥、万顷沙、南沙港区分布有厚度 20~40 m 的软土, 最厚的地方能达到 55 m, 总体上呈现为从内陆到河口、从北向南软土厚度逐渐变大的趋势, 且其变形以塑性变形为主。

根据有效应力原理可知, 孔隙水压力的改变会造成有效应力变化, 从而改变土体的应力状态, 产生形变量。由一维固结理论, 得出砂层和压缩土层的沉降量计算方法。

$$S = \frac{\gamma_w \Delta h H_{砂}}{E} \quad (1)$$

$$S_{\infty} = \frac{a}{2(1+e_0)} \gamma_w \Delta h H_{黏} \quad (2)$$

式中:  $S$ ——砂层沉降量/mm;  
 $\gamma_w$ ——水的容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ );  
 $\Delta h$ ——砂层中地下水位的下降值/m;  
 $H_{砂}$ ——砂层厚度/m;  
 $E$ ——砂层弹性模量/MPa;

$S_{\infty}$ ——压缩土层沉降量/mm;  
 $a$ ——压缩土层的压缩系数/( $\text{MPa}^{-1}$ );  
 $e_0$ ——压缩土层的初始孔隙比;  
 $H_{黏}$ ——压缩土层厚度/m。

根据 2018 年 1 月—2019 年 10 月南沙区的地面沉降监测数据, 形变量级较大的区域主要分布在河流沿岸、施工区域、围垦区域和一部分城区。对这些在重点研究区内的 6 个沉降较大的区域进行分析, 其不同区域编号对应分布位置如表 5 和图 7 所示。

表 5 沉降点计算统计信息表  
Table 5 Statistical information of settlement point calculation

区域编号	土地利用类型	地处位置
1	出海口养殖场	新垦镇、珠江出海口前沿的养殖区域
2	城区建筑区域	龙穴街道龙穴村鸡抱沙北路北东方向
3	城区建筑区域	万顷沙镇十三涌和十四涌之间的主城区
4	施工区域	珠江街道八涌和十涌之间的义和围村
5	城区建筑区域	珠江街五涌周边区域
6	施工区域	南沙明珠湾

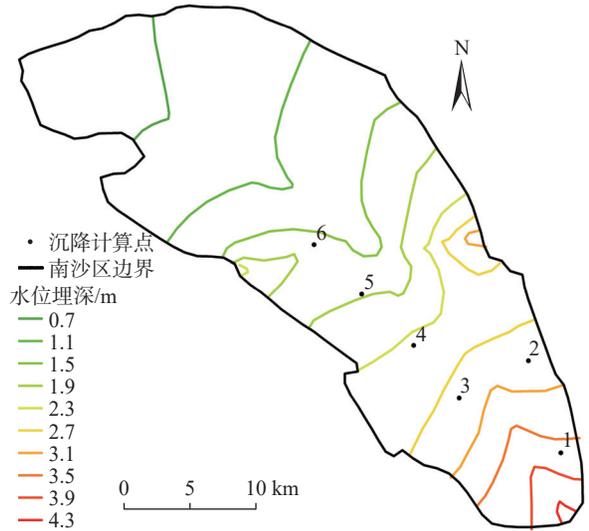


图 7 南沙区枯水期地下水水位埋深及沉降点分布图  
Fig. 7 Distribution map of groundwater level lines and settlement points during dry season in Nansha

在这 6 个沉降严重区域分别取 3 个点, 根据 Terzaghi 计算公式, 计算对应的地表沉降量。其中发生固结土层的土工实验参数见表 6。对照 InSAR 监测数据的监测时期即对应的年平均沉降速率图, 计算 2018—2019 年的地表沉降量, 其它所用到的根据钻孔数据生成地质模型数据和计算结果。

#### 3.2 地面沉降与地下水变化的关系

##### (1) 地下水位空间分布特征

从现有数据得南沙区当地基本无开采井开采地下

表 6 可压缩土层土工试验参数表  
 Table 6 Geotechnical test parameters of compressible soil

岩性名称	取样埋深/m	初始孔隙比	压缩系数/(MPa <sup>-1</sup> )	压缩模量/MPa	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
人工填土(粉土)	0~9.4	0.890~0.910	0.41~0.51	4.34~4.63	30.00~36.65	21.80~23.25	8.20~13.63	0.71~1.01
淤泥质土	0~25.0	1.038~1.550	0.64~1.03	2.70~3.35	32.40~45.83	17.50~28.48	14.90~18.61	1.27~1.57
黏土(粉质黏土、砂质黏土)	2.8~32.5	0.910~1.210	0.34~0.43	4.83~6.02	41.23~41.31	23.92~24.94	16.33~17.99	0.33~0.41

注:执行标准为GB/T50123-2019、DT-92(固结实验快速法)。

水,但发生固结的软土层会受到施工过程中基坑排水、以及地下水周期性变动的影 响。可知地下水位受到人为活动影响大,然后对照模拟所得出的地下水等水位线图所描述的流场分布,基本符合天然状态下的流场分布,即随地势总的起伏趋势和边界水位线的埋深深度呈现由西北向东南逐渐减小的趋势,并且描绘枯水期的水位埋深(图 7)。其中,等水位线两侧分布的凹线分别受上、下横沥河和珠江口的影响,中部由蕉门水道和珠江贯穿。

在重点研究区内(图 1),根据 2018—2019 年应力期末模拟的等水位线图(图 8)与考虑地面沉降影响下的等水位线图(图 9)叠加分析,可以观察到其地下水等水位线分布基本一致。可以据此推断位于重点研究区内的地面沉降变化规律是基本一致的,并且根据南沙区的水文地质条件,地面沉降一定会受到地下水水位埋深的影响,所以其变化规律与地下水水位变化有相关性。

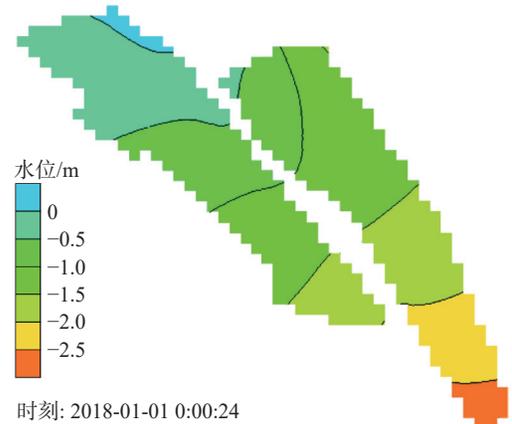


图 9 地面沉降影响下的地下水等水位线图

Fig. 9 Groundwater contour map under the influence of land subsidence

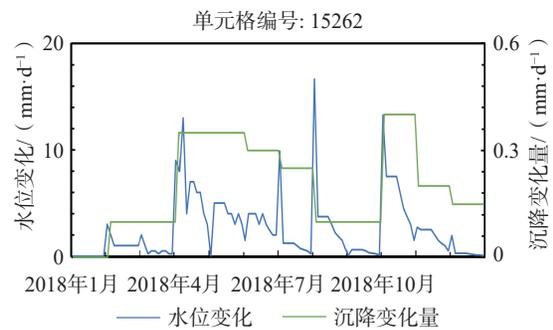


图 10 含水层 I 地下水水位变化及平均沉降速率曲线图

Fig. 10 Aquifer I groundwater level change and average settlement rate curve

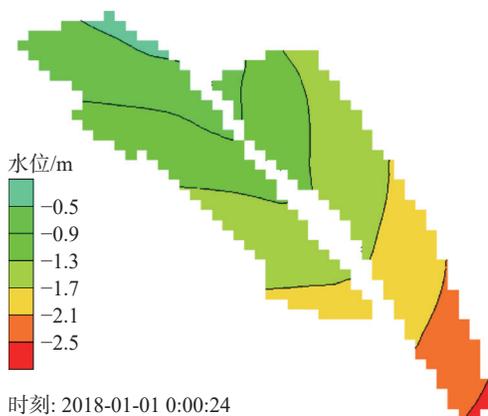


图 8 地下水等水位线图

Fig. 8 Groundwater contour map

(2) 水位动态变化特征

在 2018 年 1 月—2019 年 1 月的模拟期中,根据含水层 I 某一区域(单元格编号: 15262)的地下水水位和地面沉降动态数据,分别计算每日的地下水水位相较昨日变化量的绝对值,以及日均沉降变化量,得到图 10 的变化结果。

从 2 月开始地下水水位有较明显变动,受枯水期影响到 4 月份变化幅度超过 0.01 m/d,且地面沉降的平均变化量为 0.325 mm/d。地面沉降量在 10 月份又出现一次较大的变动,平均沉降变化量为 0.37 mm/d,其峰值出现时间和地下水水位变化基本一致。就拟合情况而言,在水位变化最大的时期,沉降速率也上升至最大值,且滞后性不明显,结合其他区域的水动态与沉降变化情况,说明南沙区大部分地区存在着良好的水力关系。

3.3 建筑荷载引起的沉降量计算分析

研究区内建筑物密集且类型基本一致,可采用等效影响荷载计算方法来估算研究区的建筑荷载值,首先需要根据土体自重应力和附加应力的关系确定荷载的影

响深度,再计算全区的等效荷载。

### 3.3.1 建筑荷载下土体自重应力和附加应力计算

(1)不同状态下的土体自重应力计算

地基土通常是以不同岩性、不同物理状态的多个土层成层分布的,进行自重应力计算时,需要分层计算。对于第  $i$  层土处的自重应力计算公式为:

$$\sigma_{cz} = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \gamma_3 H_3 + \dots = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i \quad (3)$$

式中:  $\sigma_{cz}$ ——土的自重应力/N;

$n$ ——建筑荷载下的土层数;

$\gamma_i$ ——第  $i$  层土的重度,地下水以下为有效重度、水位以上为天然重度/( $N \cdot m^{-3}$ );

$H_i$ ——第  $i$  层土中计算应力点处的厚度/m。

(2)矩形均布荷载下的附加应力计算

研究区内的基底应力可以视作矩形面积竖向均布荷载,受矩形均布荷载的地基土层,在形心处的附加荷载应力最大,形成的沉降量也最大。

首先计算矩形角点下地基土体的附加应力,如式 4。

$$\sigma_z = K_s p \quad (4)$$

式中:  $\sigma_z$ ——土的附加应力/N;

$K_s$ ——矩形均布荷载角点下的应力分布系数;

$p$ ——矩形均布荷载/N。

### 3.3.2 等效影响荷载计算

对于单个、分散的建筑物,受影响的垂向土层深度及水平范围有限,当各范围值低于莫伊标准时,便忽略不计。当大量建筑物密集分布时,形成了附加荷载的累积效应,影响的范围和深度得到了加强,等同于施加给土体一个连续分布的大面积荷载,即等效影响荷载。

根据圣维南原理<sup>[16]</sup>,对于某一深度进行等效影响荷载计算为:

$$q = \sum q_i \frac{A_i}{A} \quad (5)$$

式中:  $q$ ——密集建筑物的等效影响集度;

$q_i$ ——单体建筑物的荷载集度;

$A_i$ ——单体建筑的覆盖面积/ $m^2$ ;

$A$ ——密集建筑物的覆盖面积/ $m^2$ 。

根据中华人民共和国国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001),取 2 kPa 作为住宅楼面设计均布荷载的标准值,对各个区域进行计算。

### 3.3.3 计算压缩层深度及压缩量

建筑荷载对地基土体的影响深度是有限的,当增大到某一深度时,附加应力就会小到可以忽略的数值,即

未改变土体的应力状态、不产生形变问题,此时将这一深度视为临界深度,在这一深度之上的土层才会发生沉降变形。参照《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011),当附加应力与自重应力的比值为 1:10 时的深度,并将这一深度值视为建筑荷载的压缩深度值。

参照土地利用类型分区,划分出建筑用地荷载区、正在开发建设区及其他不会发生或者沉降可以忽略不计的区域。根据建筑荷载分布下的沉降分布情况(图 11),有 5 个沉降中心(①—⑤)位于建筑用地,受建筑荷载的影响范围较广。综合考虑地面沉降和建筑荷载类型,64% 的沉降区域受建筑用地和拟建设用地影响(其中建筑用地占 46%,拟建筑用地占 18%),其他因素用地占 36%。

### 3.4 地面沉降主要因素影响程度对比分析

如前所述,南沙区地面沉降主要因素是可压缩土层、地下水水位和地面荷载,在 3.1—3.3 节的基础上,就地面沉降较为严重的 6 个沉降计算点来看,通过数学模型计算主要因素所造成的地面沉降结果见表 7<sup>[17]</sup>。

结合分析结果,编号 1 的出海口养殖场所在区域,位于南沙区东南部,软土层厚度较大,主要受可压缩土层的影响较大,比重为 75.43%,沉降量在 84.51 ~ 95.97 mm/a 之间;编号 2、3 和 5 城区建筑区域,主要受可压缩土层和地面荷载的共同影响,尤其是 3 号区域受地面荷载影响比重为 52.14%,沉降量在 57.70 ~ 63.60 mm/a,而受地下水水位影响较小,跟含水层厚度有关;编号 4 和 6 的施工区域主要受可压缩土层的影响,比重分别为 49.74%、64.43%。

## 4 结论

(1)研究区存在多个地面沉降区,沉降速率最大的区位于珠江街道均和围村,部分沉降区年平均沉降速率超过 60 mm/a。沉降区最多的是大岗镇,主要沿江边分布,个别区域年平均沉降速率均超过 60 mm/a,其余区域均有零星沉降点分布。

(2)研究区地面沉降主要受自然和人为因素的影响,对沉降严重的 6 个沉降区分别计算量各因素对地面沉降的贡献量。出海口养殖场所在区域,年均沉降量较大,且沉降量在 112.56 ~ 127.03 mm/a,主要受可压缩土层的影响,所占比重在 75% 以上;城区建筑区域,主要受可压缩土层和地面荷载的共同影响,比重为 84.24% ~ 98.86%,而受地下水水位影响较小,跟含水层厚度有关;施工区域主要受可压缩土层的影响,比重为 49.74% ~ 64.43%。

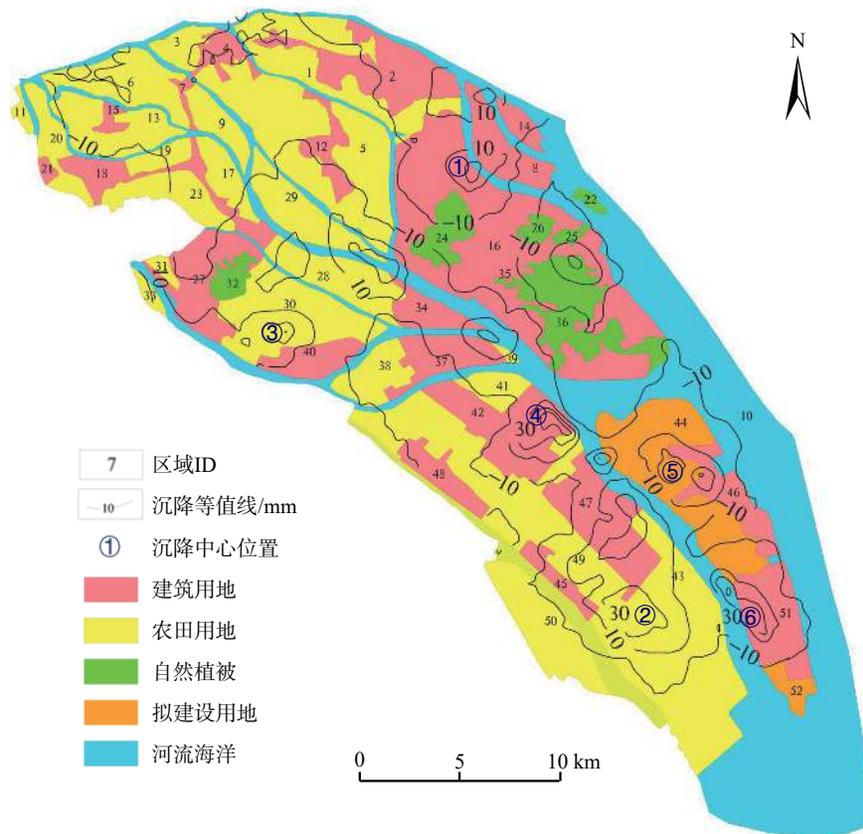


图 11 建筑荷载分布与沉降等值线图

Fig. 11 Contour map of building load distribution and settlement

表 7 沉降点主导因素影响程度的沉降量分析表

Table 7 Settlement analysis table of influence degree of dominant factors of settlement point

区域编号	地面沉降总量/(mm·a <sup>-1</sup> )	可压缩土层/(mm·a <sup>-1</sup> )	主导因素 面积占比/%	地下水水位/(mm·a <sup>-1</sup> )	主导因素 面积占比/%	地面荷载/(mm·a <sup>-1</sup> )	主导因素 面积占比/%
1	112.56~127.03	84.51~95.97	75.43	17.60~19.20	15.24	10.45~11.86	9.32
2	92.9~101.36	34.43~38.26	37.55	13.20~14.64	14.66	43.83~48.70	47.79
3	111.27~121.92	51.17~56.40	46.24	1.28~2.40	1.62	57.70~63.60	52.14
4	91.96~100.02	45.91~51.74	49.74	22.80~24.80	24.85	22.61~25.48	25.40
5	118.96~129.46	55.62~61.50	47.40	9.60~12.00	8.86	51.34~56.76	43.75
6	107.66~117.02	69.76~75.63	64.43	9.40~11.30	9.26	28.50~30.89	26.31

(3)建议完善地面沉降监测网络并加强监察措施,在沉降严重区加密 InSAR 监测及水准监测;在工作区内增加不同含水层的地下水动态监测井,密切关注地下水水位动态变化规律。

参考文献(References):

[1] 许焯霜,沈水龙,唐翠萍,等.基于地下水渗流方程的三维地面沉降模型[J].岩土力学,2005,26(增刊1):109-112. [XU Yeshuang, SHEN Shuilong, TANG Cuiping, et al. Three-dimensional analysis of land subsidence based on groundwater flow model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Sup 1): 109-112. (in Chinese with English abstract)]

[2] 刘桂卫,黄海军,杜廷芹,等.黄河三角洲地区地面沉降

驱动因素研究[J].海洋科学,2011,35(8):43-50. [LIU Guiwei, HUANG Haijun, DU Tingqin, et al. Effective factors of land subsidence in the Yellow River delta [J]. Marine Sciences, 2011, 35(8): 43-50. (in Chinese with English abstract)]

[3] 彭青华.沧州市地面沉降模型研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007. [PENG Qinghua. Study on the model of land subsidence in Cangzhou City [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007. (in Chinese with English abstract)]

[4] 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(2):153-160. [XUE Yuqun, ZHANG Yun, YE Shujun, et al. Research on the problems of land subsidence in China [J]. Geological Journal

- of China Universities, 2006, 12(2): 153 – 160. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 王伟, 党亚民, 章传银, 等. CORS网和GNSS技术在地面变形监测中的应用——以浙江东南部为例 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 73 – 77. [ WANG Wei, DANG Yamin, ZHANG Chuanyin, et al. Application of CORS network and GNSS technology in ground deformation monitoring: Taking southeast Zhejiang Province as an example [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 73 – 77. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 陈立国, 吴昊天, 陈晓斌, 等. 超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算 [ J ] . 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 138 – 145. [ CHEN Ligu, WU Haotian, CHEN Xiaobin, et al. Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading [ J ] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 138 – 145. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 胡长明, 林成. 黄土深基坑潜水区降水诱发地面沉降的简化算法 [ J ] . 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 76 – 83. [ HU Changming, LIN Cheng. Simplified calculation of settlement due to dewatering of phreatic aquifer in loess area [ J ] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 76 – 83. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 张建全, 张克利, 程贵方. 北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究 [ J ] . 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 131 – 139. [ ZHANG Jianquan, ZHANG Keli, CHENG Guifang. Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing [ J ] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 131 – 139. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警 [ J ] . 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957 – 966. [ XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [ J ] . Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957 – 966. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 吴龙飞, 陈凌伟, 彭卫平. PSInSAR技术在广州市南沙区地面沉降监测中的应用研究 [ J ] . 城市勘测, 2019(3): 127 – 130. [ WU Longfei, CHEN Lingwei, PENG Weiping. Research of PSInSAR technology in land subsidence monitoring in Nansha of Guangzhou [ J ] . Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(3): 127 – 130. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 陈玉林, 匡翠林, 戴吾蛟, 等. 广州南沙区GPS地面沉降监测数据处理 [ J ] . 大地测量与地球动力学, 2015, 35(5): 849 – 852. [ CHEN Yulin, KUANG Cuilin, DAI Wujiao, et al. Land subsidence monitoring using GPS network in Nansha, Guangzhou [ J ] . Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(5): 849 – 852. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 高磊, 陈运坤, 屈尚侠, 等. 广州南沙区软土地面沉降特征及监测预警分析 [ J ] . 人民长江, 2020, 51(增刊2): 94 – 97. [ GAO Lei, CHEN Yunkun, QU Shangxia, et al. Analysis on land subsidence characteristics, monitoring and early warning of soft soil in Nansha District of Guangzhou [ J ] . Yangtze River, 2020, 51(Sup 2): 94 – 97. (in Chinese) ]
- [ 13 ] 张德波. 广州市南沙区地面沉降易发性评价 [ J ] . 中外建筑, 2018(8): 252 – 255. [ ZHANG Debo. Susceptibility evaluation of ground subsidence in Nansha District in Guangzhou [ J ] . Chinese & Overseas Architecture, 2018(8): 252 – 255. (in Chinese) ]
- [ 14 ] 陈小月. 广州市南沙区软土地面沉降特征及城市防灾减灾的建议 [ J ] . 地质灾害与环境保护, 2018, 29(2): 17 – 22. [ CHEN Xiaoyue. Ground subsidence characteristics of soft soil in Nansha District of Guangzhou City and the suggestions for disaster prevention and reduction in urban development [ J ] . Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2018, 29(2): 17 – 22. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 陈运坤, 高磊, 屈尚侠. 广州南沙区软土分布和地面沉降特征分析 [ J ] . 资源信息与工程, 2021, 36(2): 19 – 21. [ CHEN Yunkun, GAO Lei, QU Shangxia. Study on soft soil distribution and land subsidence features in Nansha District, Guangzhou [ J ] . Resource Information and Engineering, 2021, 36(2): 19 – 21. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 介玉新, 高燕, 李广信. 城市建设对地面沉降影响的原因分析 [ J ] . 岩土工程技术, 2007, 21(2): 78 – 82. [ JIE Yuxin, GAO Yan, LI Guangxin. Analysis on the land subsidence induced by city construction [ J ] . Geotechnical Engineering Technique, 2007, 21(2): 78 – 82. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 孟世豪, 崔亚莉, 田芳, 等. 基于MODFLOW-SUB建立变渗透系数的地下水流-地面沉降模型 [ J ] . 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(2): 550 – 559. [ MENG Shihao, CUI Yali, TIAN Fang, et al. Modeling of groundwater flow-land subsidence with variable hydraulic conductivity based on MODFLOW-SUB [ J ] . Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(2): 550 – 559. (in Chinese with English abstract) ]