

引用格式：朱锦旗，龚绪龙，于军，等，2024. 苏州—无锡—常州地区地面沉降及地裂缝防控研究 [J]. 地质力学学报，30（5）：811–833.

DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2024051](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2024051)

Citation: ZHU J Q, GONG X L, YU J, et al., 2024. Prevention and control of land subsidence and earth fissures in Suzhou–Wuxi–Changzhou region[J]. Journal of Geomechanics, 30（5）：811–833. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2024051](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2024051)

苏州—无锡—常州地区地面沉降及地裂缝防控研究

朱锦旗^{1,2}，龚绪龙^{1,2}，于军^{1,2}，张云³，张岩^{1,2}，叶淑君³，王彩会^{1,2}，
许书刚^{1,2}，武健强^{1,2}，王光亚^{1,2}，刘明遥^{1,2}，顾春生^{1,2}，闵望^{1,2}，龚亚兵^{1,2}
ZHU Jinqi^{1,2}，GONG Xulong^{1,2}，YU Jun^{1,2}，ZHANG Yun³，ZHANG Yan^{1,2}，YE Shujun³，WANG Caihui^{1,2}，
XU Shugang^{1,2}，WU Jianqiang^{1,2}，WANG Guangya^{1,2}，LIU Mingyao^{1,2}，GU Chunsheng^{1,2}，MIN Wang^{1,2}，
GONG Yabing^{1,2}

1. 江苏省地质调查研究院，江苏 南京 210018；

2. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室，江苏 南京 210018；

3. 南京大学地球科学与工程学院，江苏 南京 210046

1. *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China;*

2. *Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and resources, Nanjing 210018, Jiangsu, China;*

3. *School of Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, Jiangsu, China*

Prevention and control of land subsidence and earth fissures in Suzhou–Wuxi–Changzhou region

Abstract: [Objective] The Suzhou–Wuxi–Changzhou region is one of the most severely affected areas by land subsidence, both in China and globally. In the early 1970s, land subsidence occurred and resulted in the formation of ground fissures caused by differential subsidence, thus resulting in significant economic losses. In this century, the rate of ground subsidence has decreased, with some areas experiencing regional ground resilience. The unique developmental history of ground subsidence allows one to comprehensively interpret its evolutionary process and causal mechanisms. This study aims to unravel the life cycle and driving forces of land subsidence in the Suzhou–Wuxi–Changzhou region. [Methods] To achieve this, a multifaceted approach was employed, including long-term and large-scale monitoring of three-dimensional seepage, stress, and strain, complemented by physical experimental models and numerical simulations. An analysis was conducted to synthesize the macro-evolutionary patterns and causal mechanisms of land subsidence and the formation of ground fissures. [Results and Conclusion] The findings indicate that land subsidence in the Suzhou–Wuxi–Changzhou region exhibits distinct characteristics that evolve through five discernible stages: initiation, rapid development, deceleration, stagnation, and rebound. The development of land subsidence is intricately connected to groundwater extraction, with stratum deformation arising predominantly from the compaction and dewatering of aquifers and aquitards due to pumping. During the subsidence phase, primary aquifer sand and contiguous aquitards are identified as the primary contributors to subsidence. By dissecting the causal mechanisms of land subsidence and ground fissures, this study delineates the spatiotemporal evolution of the structural compression and rebound of strata under varying conditions of deep groundwater exploitation, restriction, and prohibition, along with their respective contributions to subsidence. Ground fissures, which act as a secondary geological hazard at certain stages of subsidence, exhibit a spatial distribution and occurrence time that are closely related to groundwater levels, land subsidence, bedrock undulations, and soil-layer structural disparities. The life cycle of ground fissures can be encapsulated by the mechanical processes of compression, tension, shearing, and rebound, which highlights the triggers and critical thresholds for fissure formation due to differential

基金项目：国家自然科学基金项目（42230710）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42230710).

第一作者：朱锦旗（1965—），男，博士，研究员级高级工程师，主要从事环境地质研究。Email: njzhujinqi@126.com

收稿日期：2024-03-24；修回日期：2024-07-30；录用日期：2024-08-01；网络出版日期：2024-08-02；责任编辑：范二平

subsidence. An integrated “sky-air-ground” monitoring system that can perform full-section fiber-optic monitoring in geological boreholes and amalgamates diverse technical methods is established to obtain scientific and granular data support for land-subsidence control and prevention. Furthermore, an innovative finite-element coupling interface element method customized for regional and site-specific scales is developed. This method successfully simulates the mechanisms of stratum deformation as well as the genesis and propagation of ground fissures under complex three-dimensional geological conditions, thus facilitating the precise identification and management of subsidence and fissure prone areas. [Significance] This study highlights the government’s land subsidence control measures at various stages, which are characterized by technological innovations such as groundwater extraction restrictions and bans, thus setting a precedent for land subsidence management and groundwater resource stewardship in other provinces and cities across China.

Keywords: Suzhou–Wuxi–Changzhou region; land subsidence; earth fissures; genetic mechanism; numerical simulation; prevention and control management

摘 要: 苏州—无锡—常州（苏锡常）地区曾是中国地面沉降灾害最严重的地区之一，从 20 世纪 70 年代开始发生地面沉降，随之因差异沉降诱发地裂缝灾害，21 世纪以来沉降速率逐年趋缓，部分地区出现区域性的地面回弹，独特的地面沉降发展历程为全面解读地面沉降提供了理想的窗口。为揭示苏锡常地区地面沉降生命周期过程及其驱动机制，利用长时间序列、大区域尺度的三维渗流、应力、应变多场监测数据以及物理试验模型、数值模拟等技术对区域地面沉降与地裂缝宏观演变规律、成因机理进行综合分析。研究结果显示：苏锡常地区地面沉降经历了发生、快速发展、趋缓、滞后和反弹 5 个阶段；地面沉降与地下水开采密切相关，其地层变形主要来自于地下水开采导致的含水层和弱透水层的压密释水，主采含水砂层及相邻隔水层为沉降主要贡献层，并识别了地层压缩、回弹的时空演变特征及其对地面沉降的贡献；地裂缝是地面沉降发展到一定阶段后所产生的次生地质灾害，其空间展布及成灾时间与地下水水位、地面沉降、基岩起伏变化以及土层结构差异等因素密切相关，提出了驱动地裂缝演化的压—拉—剪—弹物理过程，识别出了地裂缝发生的触发机制和临界条件。同时建立了以地质钻孔全断面光纤监测为特色、多种技术方法融合的“天—空—地”立体化、地下水—地面沉降—地裂缝协同的监测体系，为地面沉降防控提供科学、详细的数据支撑；并创新区域—场地双尺度有限元耦合界面元法，成功实现了三维复杂地质环境条件下地层形变特征及地裂缝生成和扩展的力学机制模拟，为地面沉降、地裂缝易发区精准圈定与防控提供了解决路径；通过总结基于技术创新支撑政府实施的地下水限采、禁采等地面沉降防控实践及其成效，为中国其他省/市地面沉降防控与地下水资源管理起到示范作用。

关键词: 苏锡常地区；地面沉降；地裂缝；机理；模拟；防控

中图分类号: P641; P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 05-0811-23

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024051

0 引言

地面沉降通常指长期过量开采地下水等人类活动引起土层压缩、导致区域性高程降低的地质现象(薛禹群等, 2003; 薛禹群, 2012; 朱琳等, 2024)。地面沉降已逐渐成为全球性的灾害问题, 在过去 100 年, 34 个国家/地区报道了因过量开采地下水引起的地面沉降区 200 多处, 但实际发生地面沉降的区域远大于此。据统计, 全球受地面沉降灾害威胁的面积超过 $1200 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占陆地总面积的 8%, 据预测过量开采地下水引起的地面沉降灾害将威胁全球 19% 人口(Herrera-García et al., 2021; Parsons, 2021)。中国汾渭盆地、华北平原和长江三角洲等

经济发达地区也受地面沉降灾害的困扰(孙晓涵等, 2016; 郭海朋等, 2021), 直接表现为地面高程损失, 造成城市给排水、防洪、防涝等能力下降; 差异性地面沉降还引发了城市建筑物受损、管线破断、路基破坏等次生危害(Notti et al., 2016; 骆祖江等, 2018; Li et al., 2019); 差异性沉降显著时, 会形成地裂缝灾害(朱锦旗等, 2008), 严重影响高铁、地铁等重大工程建设与安全运行。仅长三角地区遭受的经济损失就超过 3150 亿元(郭坤一等, 2005), 区域城市地质安全与社会经济发展面临严峻的挑战。

地面沉降成因机制复杂、影响因素众多, 内在影响因素有地质条件、构造运动(Bawden et al., 2001)、自然固结(Brambati et al., 2003)等; 外部影响因素多与人类活动相关, 包括建筑荷载(严学新等,

2002; 刘寒鹏, 2010)、地下空间开发、矿产开采 (Jiang et al., 2011; Hu et al., 2012)、地下水开采、石油开采 (薛禹群, 2012; 朱琳等, 2024)、泥炭土氧化 (Sayyaf, 2014)、冻土融化 (Nelson et al., 2001) 等。因此开展地面沉降成因机制研究是精准防治地面沉降的重要前提。从宏观上说, 城市地面沉降成因机理普遍被认为是由第四纪沉积物的排水固结引起的 (Chen et al., 2003; Li et al., 2006)。从微观上讲, 地面沉降的成因机制与地层变形特征密不可分。苏州—无锡—常州 (苏锡常) 地区是过量开采深层地下水引发地面沉降最典型的代表, 众多学者通过室内实验 (施小清等, 2006a, 2006b, 2007, 2014) 研究苏锡常地区不同地层在水位变化过程中表现出的黏、弹塑性特征, 提出砂性土层的蠕变特性, 很好地解释了在地下水位基本保持不变甚至略有回升的情况下, 压缩变形量仍在不断增加的原因, 为开展区域性地面沉降模型模拟与预测奠定了基础。苏锡常地区是中国最早发现地裂缝的地区之一, 刘聪等 (2004) 系统提出了地裂缝的 5 种成因模式, 后续的研究表明地裂缝是由特定构造地质背景下地下水强烈开采引发的不均匀地面沉降所致 (于军等, 2004; 王光亚等, 2009, Wang et al., 2016)。

为精准地防控地面沉降以及地裂缝的产生, 数值模拟研究逐渐成为热点。2010 年召开的第八届国际地面沉降会议提出复杂变形条件下三维变系数区域地面沉降模型和地裂缝数学模型的研究仍是当前的难点。苏锡常地区范围大、水文地质条件差异大、土层变形复杂, 为避免用一种变形模型来描述整个区域的地面沉降特征, 薛禹群等 (2008)、于军等 (2007) 在研究土体弹塑性和蠕变特征的基础上, 建立了新的黏、弹塑性本构关系, 进而构建相应的三维变系数水流模型和垂向一维沉降模型, 较好地描述地面沉降的水—土耦合过程以及沉降量的预测。叶淑君等基于比奥模型建立显式耦合三维地面沉降模型 (叶淑君和薛禹群, 2005; 叶淑君等, 2005); Ye et al. (2018) 采用有限元与界面元耦合的方法进行三维地面沉降和地裂缝模型的求解, 实现了野外实际地裂缝的数值模拟, 极大地提升了对苏锡常地区地裂缝触发和发育机理的认识。

从 20 世纪 90 年代起, 江苏省地质调查研究院就在苏锡常地区实施地面沉降调查与监测工程, 逐步建成全域覆盖的监测体系, 系统开展地面沉降、地裂缝成因机制研究, 进行了大尺度、变系数地面沉降与地裂缝的模拟预测, 支撑政府在全国率先出

台了地下水禁采政策, 建立了相对成熟的地面沉降防控体系, 并取得了显著的成效。文章系统梳理了近年来苏锡常地面沉降演化历程、成因机理、监测技术、数值模拟、防控措施等方面取得的成果; 并针对新形势下地面沉降特点, 提出相应的防治建议, 对其他类似地区地面沉降防控工作具有借鉴意义。

1 地面沉降与地裂缝演化特征

1.1 区域背景

苏锡常地区地势平坦开阔, 湖荡、河流密布, 是中国典型的水网平原区, 地面标高为 2~7 m, 总的地势由西南往东北微倾, 在环太湖带及中部腹地地区孤山残丘沿东北向零星分布。受基岩地质构造和古地貌控制, 第四纪松散层厚度自西向东介于 60~360 m, 其间发育有多个含水砂层和软土层。

松散岩类孔隙水是苏锡常平原区主要地下水类型, 自上而下可划分为潜水和第 I、第 II、第 III 承压含水层组, 在全区均有分布。含水层组主要由粉细砂、中粗砂、砂砾石等组成, 含水层之间为由黏土、粉土及粉砂互层组成的弱透水层。含水层的岩性、厚度、分布及其富水性受古河道的规模、演变和展布方向控制, 第 I 承压含水层顶板埋深为 20~96 m, 多呈透镜体分布, 厚度为 10~50 m, 单井涌水量一般为 100~1000 m³/d。长江沿岸与第 II 深层承压含水层沟通, 单井涌水量达 1000~2000 m³/d。第 II 承压含水层顶板埋深为 60~150 m, 厚度为 20~80 m, 富水性一般为 1000~3000 m³/d。第 III 承压含水层顶板埋深一般为 150~250 m, 厚度为 10~80 m, 富水性一般为 100~3000 m³/d。第 II、III 承压含水层厚度大、富水性强、水质优良, 是苏锡常平原区主要开采层。

1.2 地面沉降发展及现状

苏锡常地面沉降于 20 世纪 70 年代后开始显现, 仅出现在苏州、无锡、常州 3 个中心城市及锡西地段, 沉降速率一般小于 10 mm/a, 累计地面沉降量大于 200 mm 的地区仅分布在中心城市区, 沉降中心彼此孤立。80 年代中期以后, 地面沉降进入快速发展阶段, 沉降速率明显增加, 普遍大于 20 mm/a, 局部地区超过 100 mm/a, 沉降范围迅速扩大至区域范围, 初期孤立的沉降漏斗区连成一片 (图 1)。位于沉降中心的无锡市洛社镇最大累计沉降量达 2.8 m, 最大沉降速率超过 120 mm/a。1995 年以后, 政府采取了一系列控制措施, 城市中心的地面沉降发展

趋势减缓(图2), 沉降速率也相应减至约 50 mm/a, 受地面沉降的滞后作用影响, 沉降范围仍进一步扩

大。至 2002 年, 累计沉降量大于 200 mm 的地区面积约为 4400 km²(表1), 约占苏锡常平原地区总面积

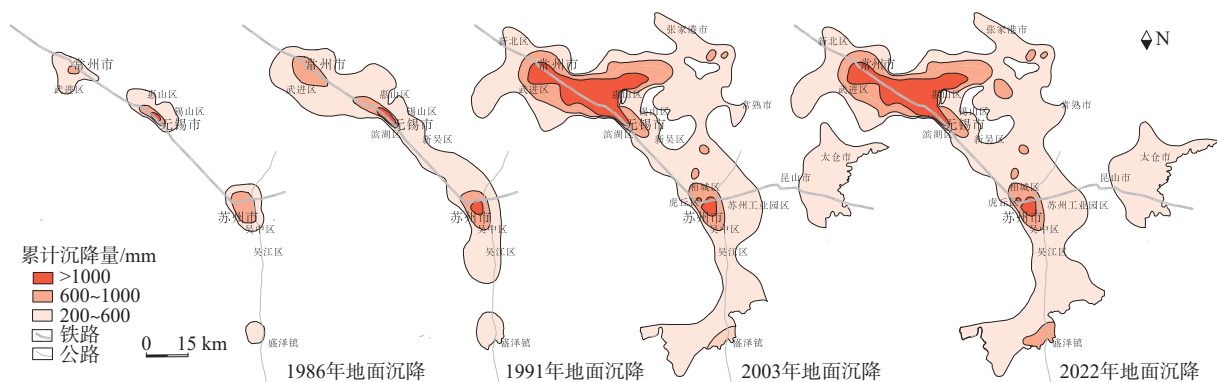
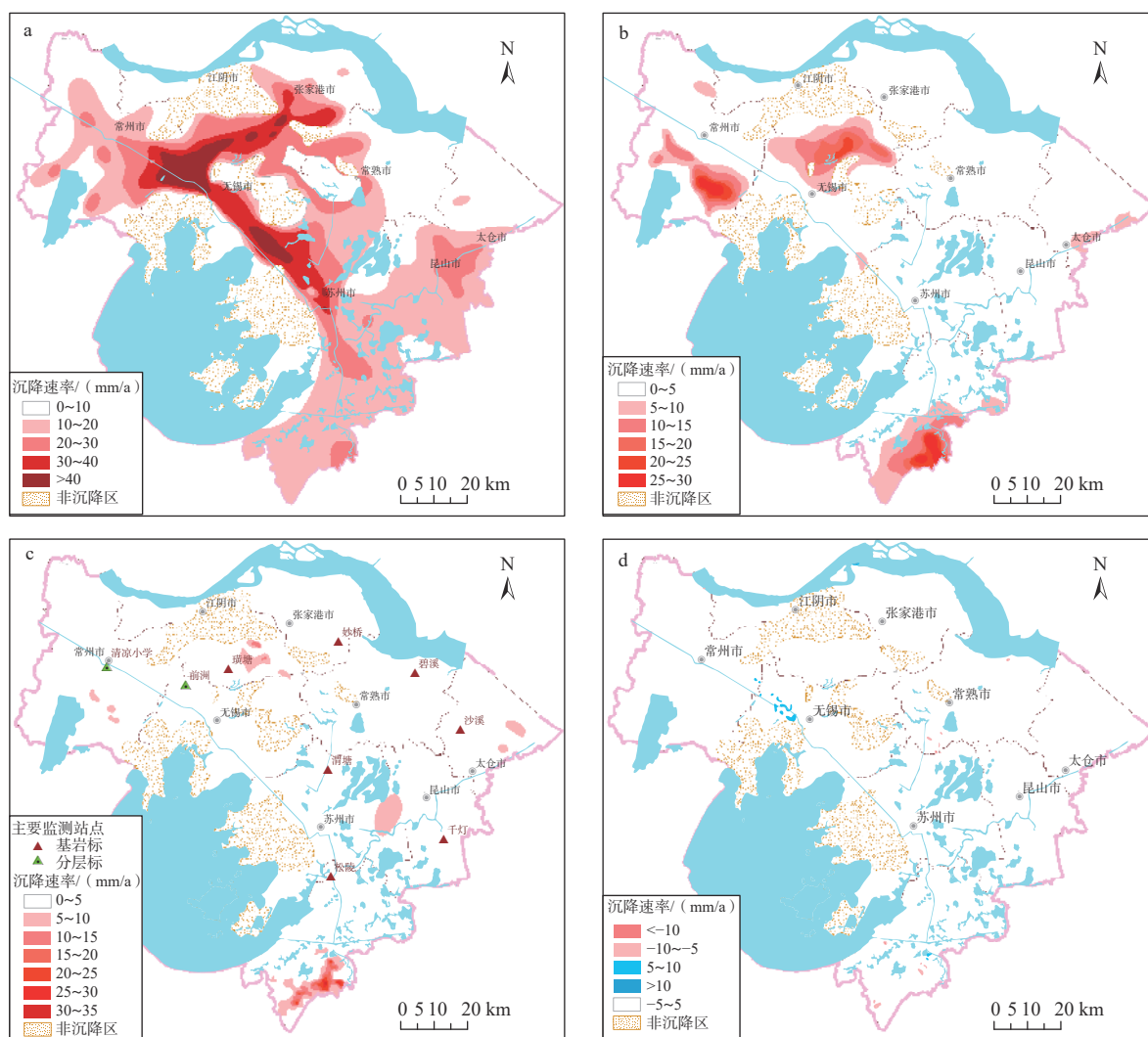


图1 苏锡常地区地面沉降发展变化

Fig. 1 Evolution of land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou region



a—2002 年; b—2010 年; c—2015 年; d—2022 年

图2 苏锡常地区不同年份地面沉降速率对比

Fig. 2 Comparison map of land subsidence rates in Suzhou-Wuxi-Changzhou region by year

(a) 2002; (b) 2010; (c) 2015; (d) 2022

的 1/2，沉降量为 500mm 的等值线已连片圈合了 3 个中心城市，面积超过 1500 km²。无锡地区为苏锡常地区地面沉降最严重的地区，无锡市区（运河以

北）、锡西和江阴南部等地段，累计沉降量都在 1000 mm 以上，在石塘湾、洛社、前洲一片的累计沉降量均超过 1400 mm。

表 1 苏锡常地区地面沉降发展变化情况

Table 1 List of changes from development of land subsidence in Suzhou–Wuxi–Changzhou region

时间	地面沉降漏斗面积/km ²		
	累计沉降量介于200~600mm	累计沉降量介于600~1000mm	累计沉降量>1000mm
1986年	401	108	7
1991年	1473	224	37
2002年	3287	635	401
2022年	3706	708	409

2000 年苏锡常地区开始全面实施地下水禁采，地面沉降形势明显好转，全区出现不同程度的减缓特征（表 2）。2000—2008 年，大于 5 mm/a 的沉降区面积由 4000 km² 缩减到 1200 km²，减幅达 70%，核心的沉降区（洛社、玉祁、前洲）平均年沉降速率由大

于 20 mm 减小到小于 10 mm，而常州南部、江阴南部、吴江南部沉降速率减缓较慢。2015 年，大部分地区地面沉降速率小于 5 mm/a，沉降速率大于 20 mm/a 的区域面积仅有 41 km²。

表 2 部分基岩标、分层标水准测量结果

Table 2 Leveling results of bedrock and layered extensometers

序号	地点	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2015年	2020年
1	清凉小学	-4.1	+1.4	+4.9	+9.2	+5.3	+4.87	+8.3	+7.7
2	前洲	-18.3	-10.5	-10.1	-5.3	-1.5	-0.13	+3.7	+7.9
3	璜塘	-15.8	-14.0	-21.5	-14.7	-15.9	-14.1	-0.1	+5.7
4	渭塘	+4.1	-1.4	-1.8	+0.7	-0.4	-1.06	+4.1	+2.7
5	松陵	-6.8	-3.9	-4.0	-3.9	-4.5	-1.38	+0.5	-0.6

注：+表示地面回弹，-表示地面沉降

2022 年，苏锡常地区地面沉降得到了有效控制，全区年沉降速率总体以小于 5mm 为主（图 2），深部地面沉降已基本停止，累计沉降量大于 200 mm 的地区面积超过 4800 km²，部分地区存在着地面回弹。

1.3 地裂缝发展及现状

苏锡常地区产生的地裂缝是地面沉降发展到一定阶段后所发生的次生地质灾害，主要分布在常州东部、无锡西部及北部、江阴南部等，其发育过程与地面沉降关系密切。

1989 年，最早在常州市武进区横林镇孟瑶头村发现第 1 条地裂缝；20 世纪 90 年代后，苏锡常地面沉降进入快速发展期，地裂缝发生频率基本保持在每年 1~2 个新灾点；至 1995 年，地裂缝发生进入高峰期，在常州市横林镇、无锡市锡山区、苏州市张家港相继发生 6 处地裂缝（图 3）；直到 2002 年，每年

都有新的地裂缝出现。2002 年后未新增地裂缝。截至目前，全区共调查地裂缝灾点 25 处（图 4），其中常州 8 处，无锡 14 处，苏州 3 处（武健强等，2014）。地裂缝成带状展布，方向与区域主要构造北东—南

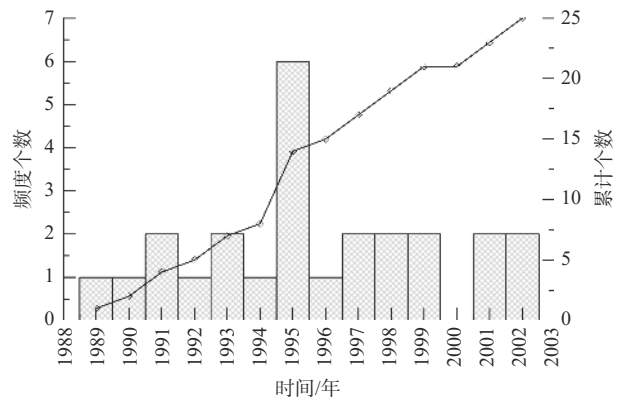


图 3 苏锡常地区地裂缝发生频度直方图

Fig. 3 Histogram of frequency of earth fissures occurrence in Suzhou–Wuxi–Changzhou region

西方向相吻合,裂缝带宽度一般在 30~400 m, 长度为 100~2000 m, 地裂缝两侧高差明显, 一般为 5~15 cm, 在钱桥毛村园的地裂缝两侧高差达 40 cm 以上。

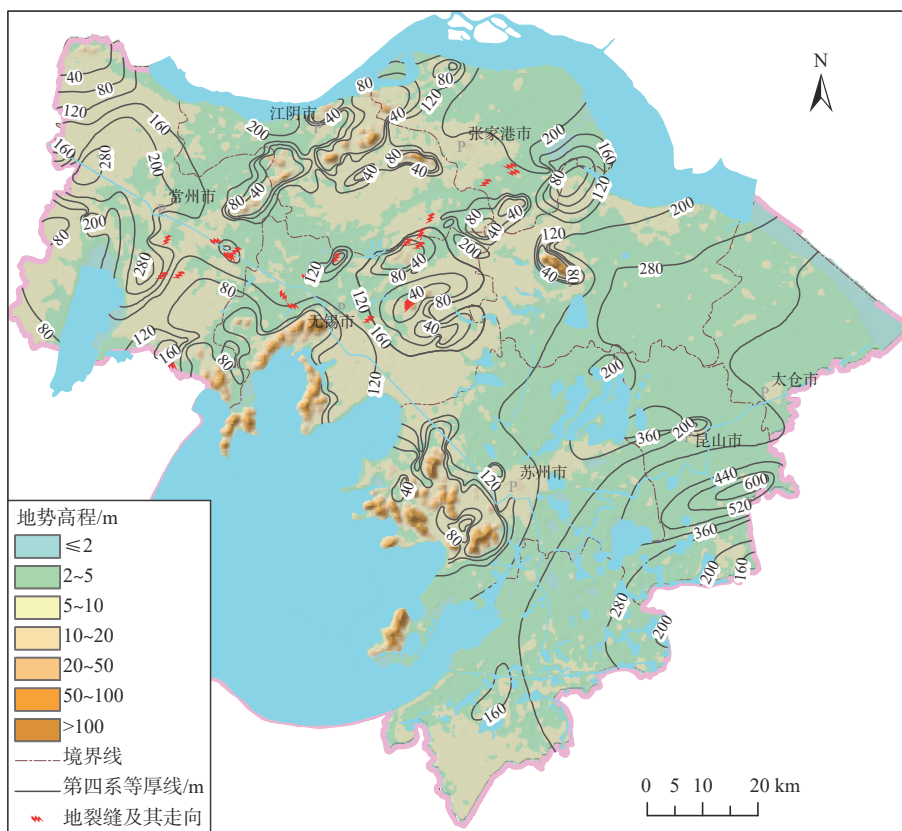


图 4 苏锡常地区基岩埋深等值线及地裂缝分布图

Fig. 4 Contour map of bedrock buried depth and distribution of earth fissures in Suzhou-Wuxi-Changzhou region

地下水禁采后,通过对其中 7 条地裂缝的长期监测发现,地裂缝与区域地面沉降活动规律相一致,活动性逐步趋稳。以石塘湾地裂缝为例,禁采前平均每年发生的差异性沉降大于 20 mm,禁采后,地裂缝活动逐年减弱(图 5),2008 年后全年的活动

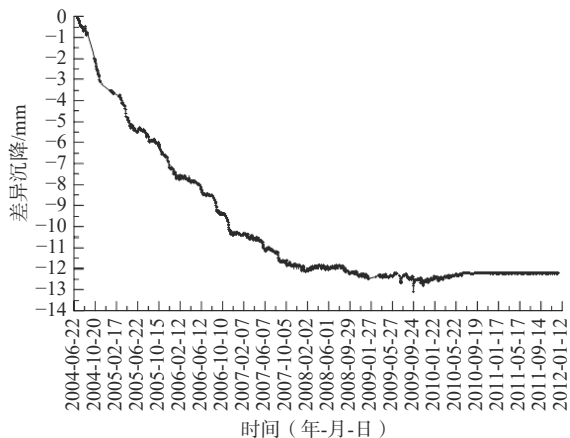


图 5 石塘湾地裂缝垂向差异沉降动态曲线

Fig. 5 Evolution graph of vertical differential settlement across Shitangwan earth fissure

量接近零,基本不活动。

1.4 地面沉降的生命周期划分

苏锡常地区地面沉降发生、发展具有明显的阶段性。为准确刻画地面沉降发展历程,制定精准的防控措施,刘明遥等(2022)引入了“地质灾害防治的全生命周期管理理念”,基于江苏省首个分层标(常州市天宁区清凉小学分层标)的监测数据开展了地面沉降生命过程研究。

常州分层标建于 1983 年(庞炳乾等, 1984),由 1 个地面标、10 个分层标和 1 个基岩标组成,其标组结构见图 6。基岩标成标深度为 288.09 m。根据主要沉降贡献层第 II 承压含水砂层及其顶板的形变特征(图 7)将地面沉降生命周期划分为 5 个过程。

(1) 地面沉降产生期(I)

该阶段地下水位埋深较浅,水位下降较慢,沉降量主要来自含水砂层压缩。地下水位下降速率和含水砂层压缩速率均较平缓并有加速趋势。

(2) 地面沉降快速发展期(II)

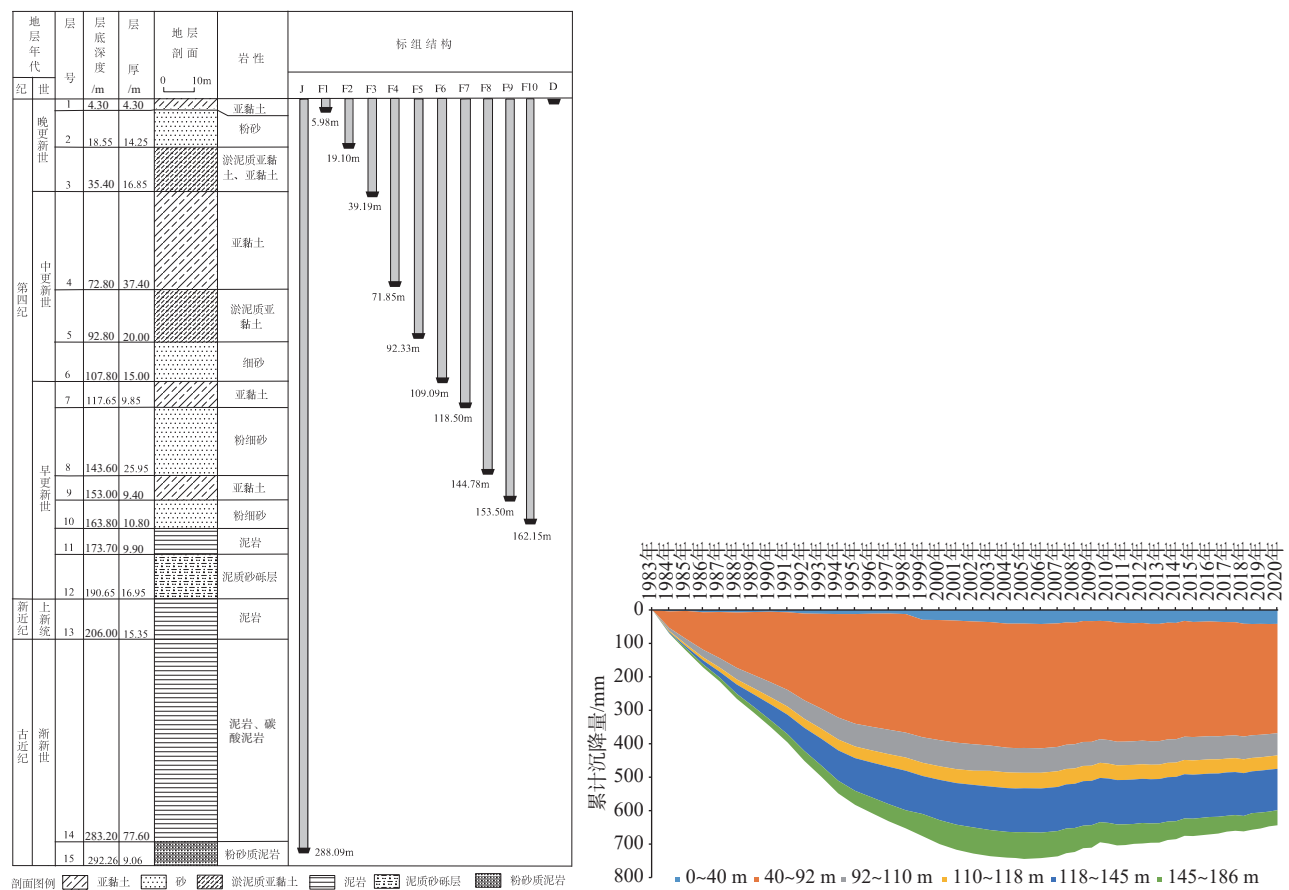


图 6 常州分层标组结构及标组主要层位沉降量

Fig. 6 Structure of Changzhou stratified marker group and main-layer settlement of marker group

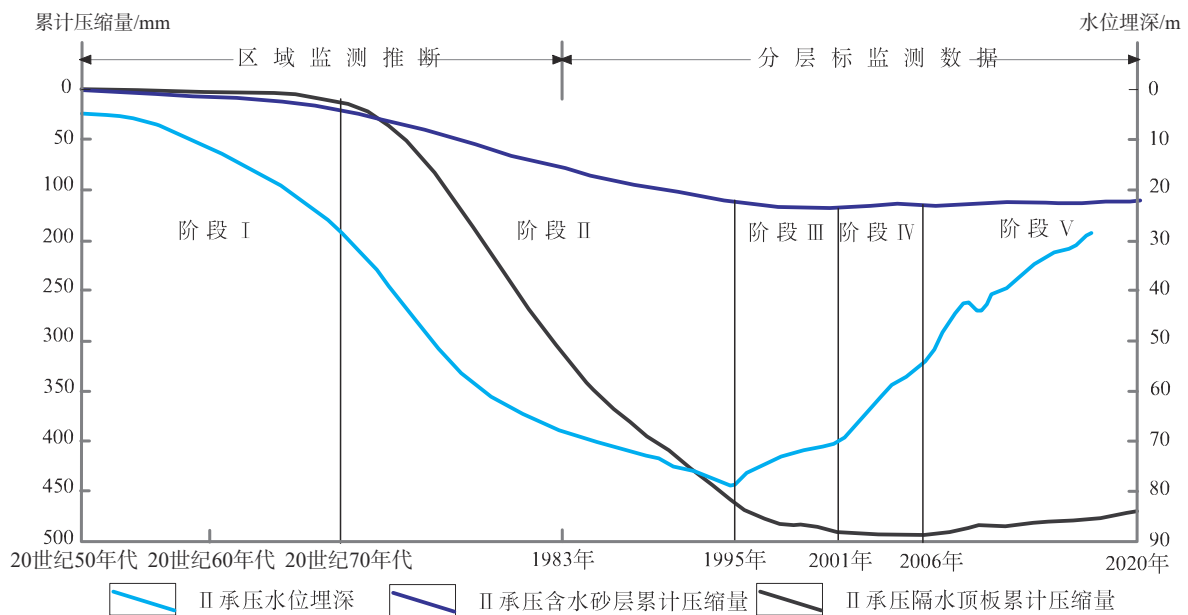


图 7 Schematic diagram showing life-process division of land subsidence

该阶段地下水位快速下降, 地层进入快速压缩阶段, 沉降量主要来自含水砂层和相邻弱透水层压缩, 弱透水层逐渐成为沉降的主体。第 II 承压水位

埋深超过 70 m, 以平均 1.3 m/a 的速度持续下降, 至 1994 年接近 80 m。含水砂层沉降速率基本在 5 mm/a 以上, 弱透水层沉降速率由平均 7.09 mm/a 增

加到 40.15 mm/a。

(3) 地面沉降发展趋缓期(Ⅲ)

该阶段地下水位长期处于较低状态,地层压缩速率趋缓。含水砂层压缩速率有所减小,相邻弱透水层压缩速率呈明显趋缓,至 1994 年减小到 14.38 mm/a。

(4) 地面沉降滞后期(Ⅳ)

该阶段地下水位出现回升,地层呈继续压缩,但压缩速率出现大幅度减小。1995—2001 年第Ⅱ承压地下水位平均回升速率为 1.31 m/a,但水位埋深仍超过 70 m。含水砂层压缩速率趋缓,由 2.94 mm/a 逐渐降低至 1.02 mm/a,压缩滞后约 6 年;相邻的弱透水层压缩速率持续减小,压缩速率基本在 2.2~4 mm/a。

(5) 地面沉降回弹期(V)

该阶段地下水位进入快速回升阶段,地面沉降进入稳定期,含水砂层和相邻隔水层出现回弹。自 2002 年第Ⅱ承压水位大幅度回升(2.5 m/a),含水砂层沉降已停止并呈轻微回弹;主采层的顶板沉降速率减小,至 2006 年减小至 0.2 mm/a,2007 年开始回弹,相比水位回升滞后时间约 12 年;主采层底板压缩基本停止,并在 2003 年开始回弹,滞后时间约 8 年。

常州分层标地面沉降过程呈现了一个完整的

生命周期。通过生命周期划分得到了 3 个标志性的水位,分别是第Ⅱ承压含水层快速压缩水位(埋深为 30~40 m)、历史最低水位(埋深为 70~80 m)、压缩-回弹水位(埋深为 65 m)。压缩-回弹水位是地层经历过一次压缩后,随着地下水位回升,经滞后效应后首次出现回弹时的水位,该水位的意义在于当地下水位再次下降时,只要水位不低于压缩-回弹水位,就不会出现较严重的地面沉降(刘明遥等, 2022)。

2 成因机理研究

2.1 孕灾地质条件

苏锡常地区的地质环境背景决定了该地区地面沉降与地裂缝的时空分布及发育特点。

2.1.1 区域地质构造

区域地质构造控制着古水动力条件,从而影响着松散层的沉积(图 8),也决定了地面沉降的潜在空间;同时又因局部地段基岩面隆起,发育潜伏山体,导致松散层厚度发生突变,又为差异性地面沉降创造了条件。苏锡常地区隶属于扬子板块,区内主干断裂带以北东向、北西向为主,对第四纪沉积作用及古河流、(古)海岸线均有控制作用。据统计,发生地裂缝的地区基岩面埋深一般在 50~100

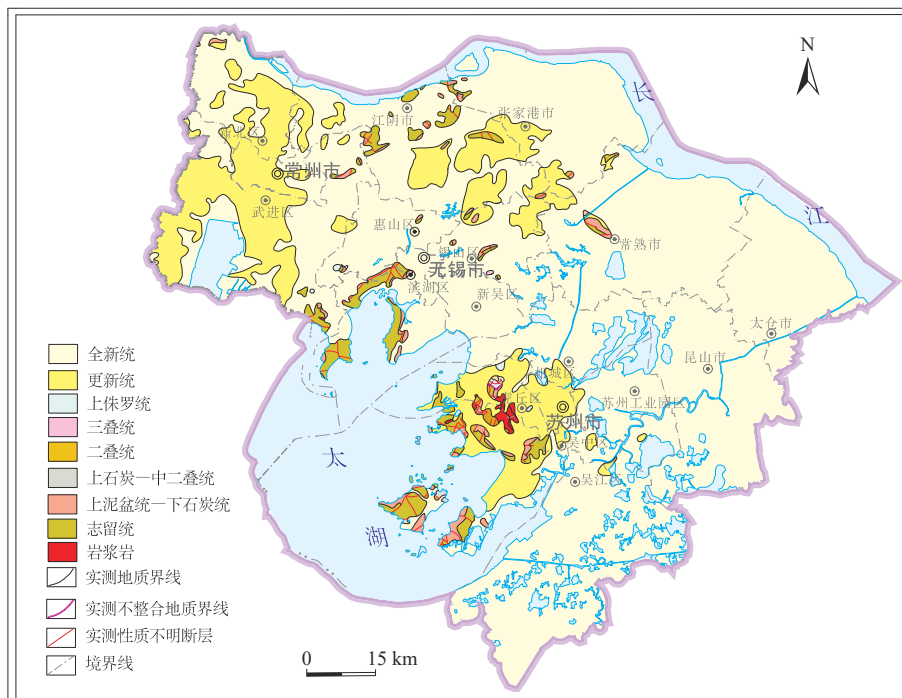


图 8 苏锡常地区地质图

Fig. 8 Geological map of Suzhou-Wuxi-Changzhou region

m 内变化, 地裂缝的展布方向绝大多数为北东向 (占总数 68%; 图 4), 与其下潜山的走向相吻合, 反映出与区域性构造格架相一致的特征, 说明基岩面起伏、构造作用与地裂缝的发生有着密切关系。

2.1.2 多层状松散地层结构与易压缩性软土分布

苏锡常地区第四系分布广泛, 厚度变化较大,

一般为 100~260 m, 其间分布着不同时期形成的湖沼相、海相软土层和古河道相松散砂层, 垂向上发育了多个含水层和弱透水层 (图 9), 这些可压缩地层为苏锡常地区地面沉降和地裂缝发育提供了物质基础。

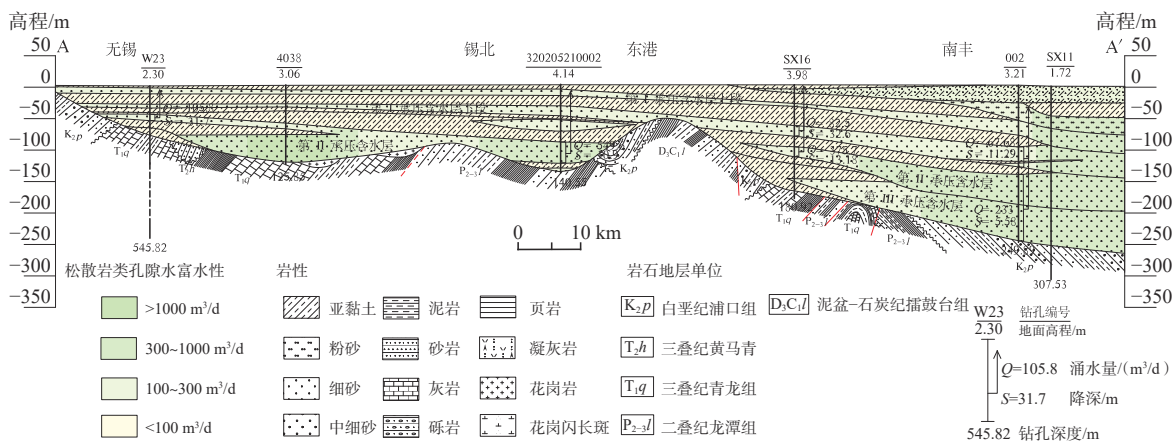


图 9 无锡—张家港水文地质剖面图 (剖面位置见图 10)

Fig. 9 Hydrogeological profile from Wuxi to Zhangjiagang

通过空间位置的对比发现, 地面沉降、地裂缝的发育与古河道含水砂层的空间变化有着密切关

系, 超过 600 mm 的沉降区基本落在古河道范围内, 且沉降漏斗沿着古河道方向扩展 (图 10), 大体上呈

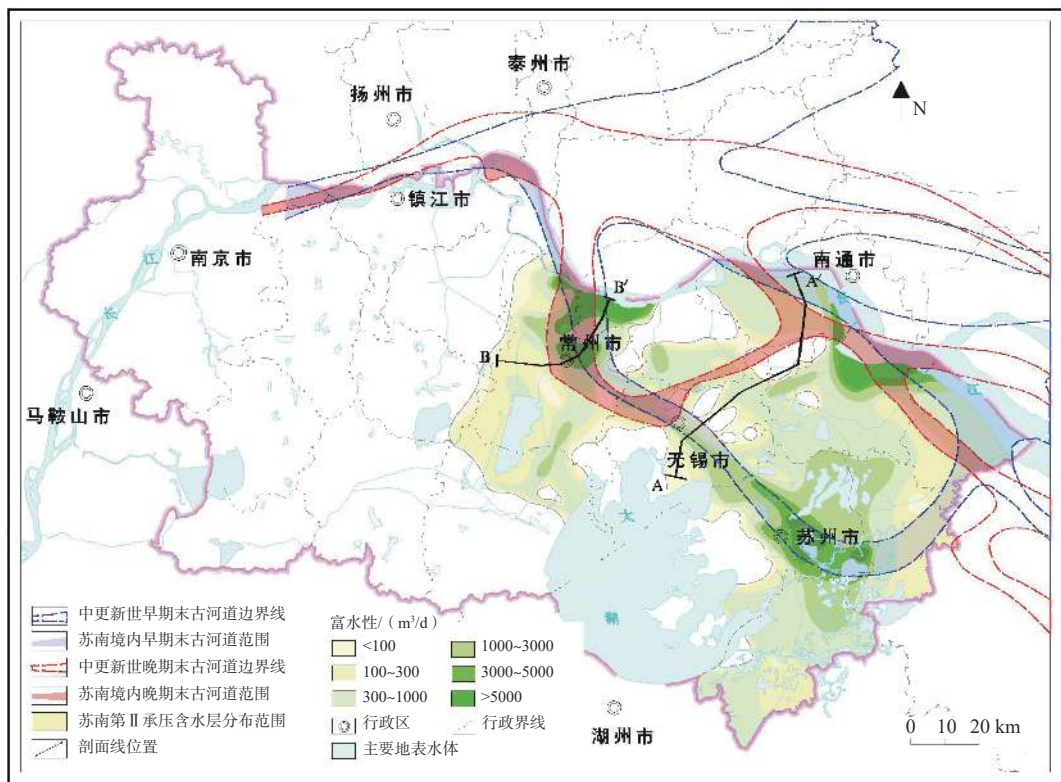


图 10 长三角地区中—更新世古河道分布图

Fig. 10 Distribution map of ancient river channels in middle Pleistocene of Yangtze River Delta region

椭圆状;大量地裂缝分布在含水砂层厚度突变区域,也说明了松散地层结构对地面沉降、地裂缝分布的控制作用。

同时区内海相和湖沼相软土层分布广、厚度不均,总体上是东部厚、西部薄,地层多处于欠固结状态。该软土层天然含水量较高、呈流塑—软塑状,在强烈开采地下水的作用下,极易失水、被压密,形成地面沉降。如常州地区软土层少且薄,而无锡西部地区软土层较多且厚度较大,2处地下水开采历史和水位下降过程相近,但地面沉降差异较大,差异化沉降体现了软土分布对地面沉降的影响。

2.1.3 相对封闭的地下水主采层促进地面沉降的发生

苏锡常地区的主采层为第Ⅱ承压含水层,其顶板埋深在西部常州地区约60~70 m,由西向东埋深增大,苏州以东增至110~130 m。根据 ^{14}C 同位素的

测试结果,在沿江地区,第Ⅱ承压地下水年龄小于2000 a(图11),在远离长江的地区,地下水年龄普遍在5000~15000 a,表征局部地下水受到了长江水的人渗补给。同时随着距长江的距离增加,地下水年龄也呈现增大的趋势,远离长江的常州洛阳—无锡洛社一带的降落漏斗区,地下水年龄在15000 a左右,没有显示出受到明显越流补给的特征,说明第Ⅱ承压水与上覆含水层水力联系较差。另外结合沿江氢氧同位素的测试结果,在临江1 km处,第Ⅱ承压水的水源中长江水占比25%;而临江9 km处,第Ⅱ承压水的水源中长江水占比不足1%,该现象说明长江水对第Ⅱ承压水形成了补给,但短时期内补给范围有限。因此在高强度地下水开采作用下,极易消耗含水层静储量,造成地下水位快速下降,从而诱发地面沉降。

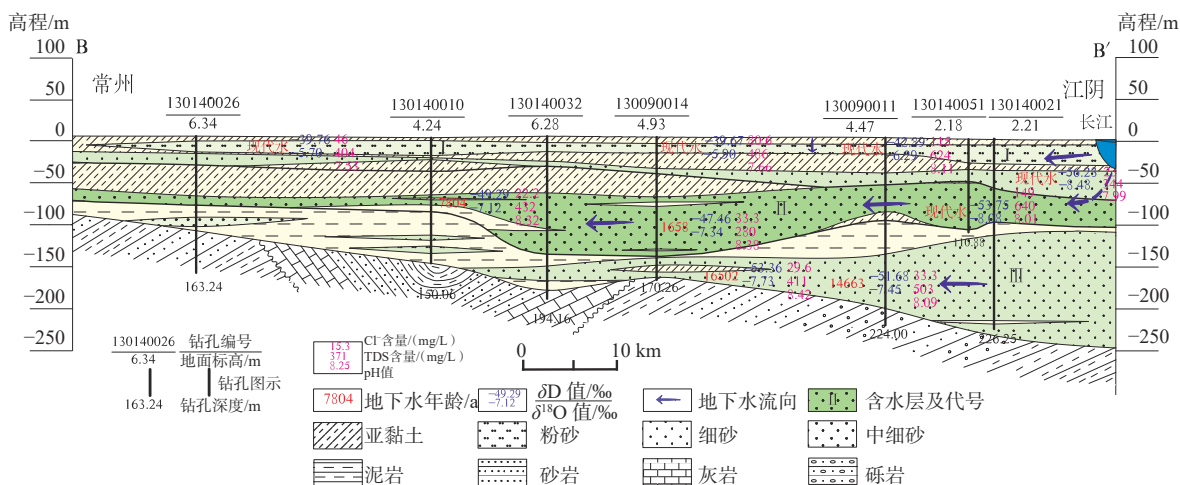


图11 常州—江阴水文地质剖面图(剖面位置见图10)

Fig. 11 Hydrogeological profile from Changzhou to Jiangyin

2.2 诱发因素

苏锡常地区地面沉降的发生和发展在时空上与深层地下水的开采具有密切关系。苏锡常地区地下水开采经历了开采初期—城市超采期—区域超采期—压缩控制期—禁采期5个阶段,地面沉降的发展在时间上与主采层地下水开采量、地下水位变化表现出较好的同步性,沉降速率呈现出与地下水开采相匹配的阶段性变化特征(图12)。在空间分布上,地面沉降漏斗中心与主采层水位降落漏斗中心基本相符,漏斗形态基本相似(图13),反映了深层地下水的连年超采和地下水位的持续下降是诱发苏锡常地区地面沉降直接因素。1990年中期,主采层地下水漏斗中心锡西前洲、洛社一带最大水

位埋深超过80 m,区内近400 km²范围内水位埋深已低于含水层顶板埋深(图13),呈现疏干开采状态,沉降速率在80~120 mm/a。

2.3 地面沉降的成因机制

2.3.1 土体分层变形特征

(1) 土体变形的主要贡献层

苏锡常地区不同层位、不同岩性土层的变形特征是各异的(图14)。据常州典型分层标监测数据(Wang et al., 2016; 表3)可知,浅部地层(0~39.19 m)压缩量小、对地面沉降的贡献不大,中—深部地层(39.19~144.78 m)压缩量占总沉降量的93%以上、是主要贡献层土层,说明沉降主要来自主采层及其顶底板的压缩变形。

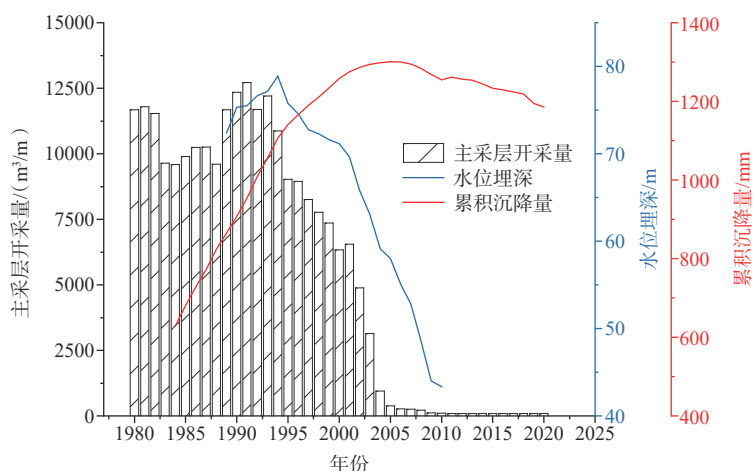
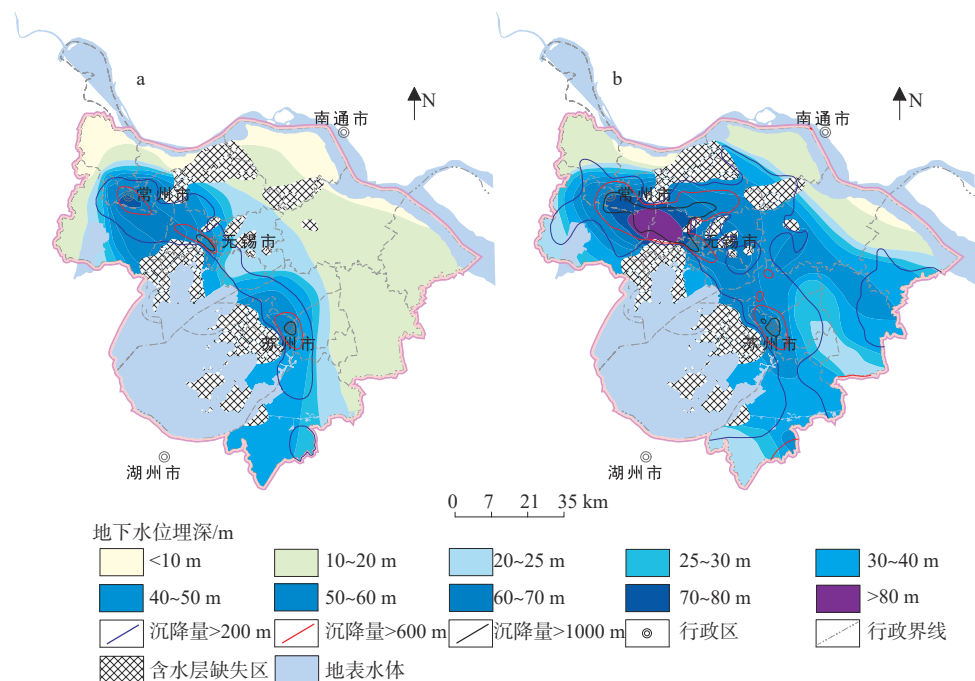


图 12 常州市地下水开采量、主采层水位埋深及地面累计沉降量关系曲线图

Fig. 12 Curve diagram showing relationship among amount of groundwater extraction, water-level depth in main extraction layer, and cumulative land subsidence in Changzhou



a—1990 年; b—2000 年

图 13 苏锡常地区主采层地下水位埋深与累计沉降量关系图

Fig. 13 Map of groundwater depth and cumulative land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou region

(a) 1990; (b) 2000

(2) 土体变形过程

通过对分层标长期监测数据的研究发现, 土体的变形经历了先压缩后回弹的过程。①压缩变形: 1984—2002 年含水层和弱透水层均呈现不同程度的压缩。其中含水层的应变(0.0046)比其直接顶板的应变(0.012)及底板的应变(0.005)小, 比间接顶板的应变(0.00373)稍大, 这主要是由于含水砂层的渗透系数大, 孔隙水压力对地下水位变化的

响应快; 而其顶底板弱透水层渗透系数小, 孔隙水压力消散则需要一定的时间。同时顶板的异常高应变也是由于其为高压缩性软土、极易压缩变形造成的。

②地面回弹: 2002 年后, 常州分层标第Ⅱ承压含水层及其相邻弱透水层土均出现回弹, 但回弹量仅相当于前期压缩量的 7.94%、3.8% 和 9.7%, 由此可以推断, 不论是砂性土、还是黏性土, 压缩过程大

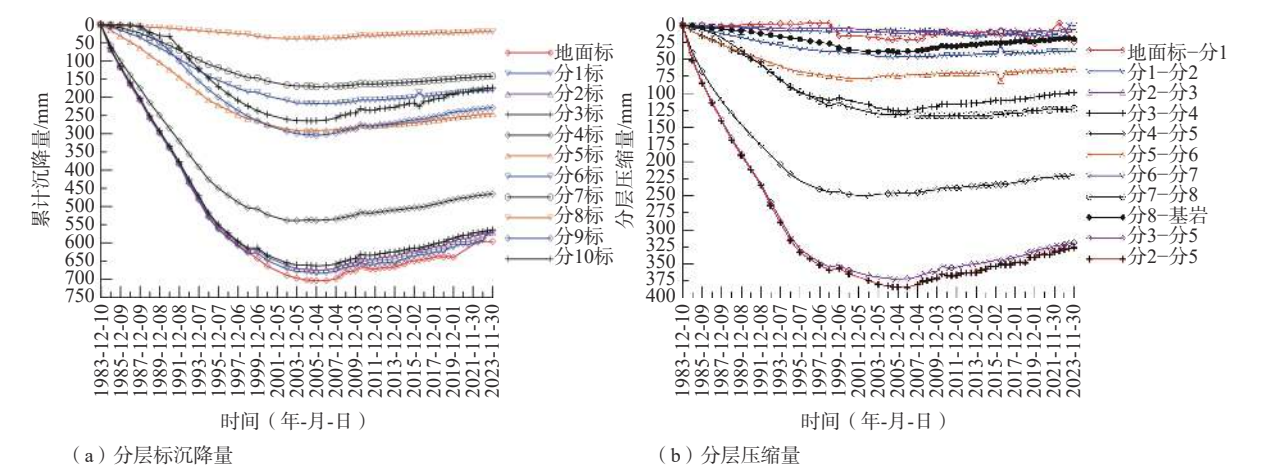


图 14 常州地面沉降及地层结构性变形（压缩/回弹）时序曲线图
Fig. 14 Time-series curve of land subsidence and stratum structural deformation in Changzhou
(a) Subsidence of benchmark and each layered mark; (b) Layered compression

表 3 常州典型分层标各层形变情况（1984—2023 年）

层号	起止深度/m	主要岩性	监测层段	形变情况
1: 地面标—分1	0~5.98	亚黏土	第Ⅰ承压含水层顶板	形变量较小, 总体稳定
2: 分1—分2	5.98~19.10	粉砂	第Ⅰ承压含水砂层	轻微压缩, 总体稳定
3: 分2—分3	19.1~39.19	淤泥质亚砂土、淤泥质亚黏土、粉砂和亚黏土	第Ⅰ承压隔水底板	1984—2006年累计压缩12.63 mm 2007—2023年累计回弹5.38 mm
4: 分3—分4	39.19~71.85	亚黏土	上段 第Ⅱ承压隔水顶板	1984—2006年累计压缩125.29 mm 2007—2023年累计回弹26.38 mm
5: 分4—分5	71.85~92.33	淤泥质亚黏土	下段	1984—2002年累计压缩250.65 mm 2003—2023年累计回弹30.82 mm
6: 分5—分6	92.33~109.09	细砂、粉砂	第Ⅱ承压含水砂层	1984—2002年累计压缩79.11 mm 2003—2023年累计回弹13.84 mm
7: 分6—分7	109.09~118.50	亚黏土	第Ⅱ—Ⅲ承压弱透土层	1984—2004年累计压缩46.97 mm 2005—2023年累计回弹8.88 mm
8: 分7—分8	118.50~144.78	粉细砂、细砂夹亚黏土、黏土	第Ⅲ承压含水砂层	1984—2010年累计压缩132.6 mm 2011—2023年累计回弹10.4 mm
9: 分8—基岩	144.78~288.09	亚黏土、粉细砂、泥岩、泥质砂砾层	第Ⅲ承压下部地层	1984—2005年累计压缩40.06 mm 2006—2023年累计回弹20.12 mm

部分是不可逆的, 主要压缩变形是塑性的、黏弹塑性的, 而其弹性变形量都是很小的。

2.3.2 土层的塑性变形和蠕变特征

通过分析苏锡常地区多年地面沉降监测结果发现, 该地区地面沉降具有明显的滞后效应。黏性土、粉砂、细砂均具有蠕变性(施小清等, 2007), 其变形量随时间延长而增加, 但变形速率不断减小, 最后趋近于稳定, 这是沉降滞后的主要原因。

综合以上分析可知, 该地区地面沉降来自于以

下 2 种变形: 一是有效应力引起的变形, 即地下水开采导致的含水层和弱透水层的压密释水; 二是蠕变引起的变形, 即在作用于土体上的有效应力保持不变的情况下, 土体的变形仍随时间的延长而增加, 在水位不再下降甚至略有回升的情况下, 地面仍会继续下沉。

2.4 地裂缝的成因机制与动力学过程

2.4.1 地裂缝的成因模式

苏锡常地区的地裂缝是在特定的地质环境背

景条件下,由过量开采地下水引起的地面不均匀沉降所致。其空间展布及成灾时间与地下水水位、地面沉降、基岩起伏变化以及土层结构差异等因素密切相关。利用优势面理论及聚类分析方法对地裂缝灾害的形成机制进行分类归纳(刘聪等, 2004; 朱

锦旗等, 2016), 其主要成因类型有: 基岩潜山型、埋藏阶地型、岩溶塌陷型、土层结构差异型和地下水综合开采型 5 种(图 15), 其中前 2 种最为常见, 产生的地裂缝方向性明显, 主裂缝发育方向平行于古潜山延伸方向或者阶地陡坎方向。

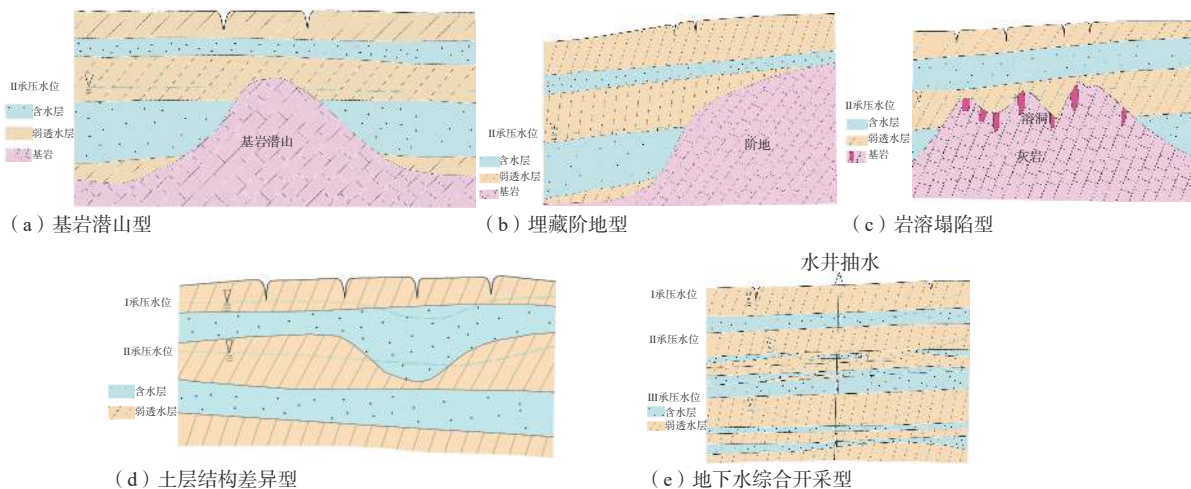


图 15 地裂缝的成因模式

Fig. 15 Genesis models of earth fissure

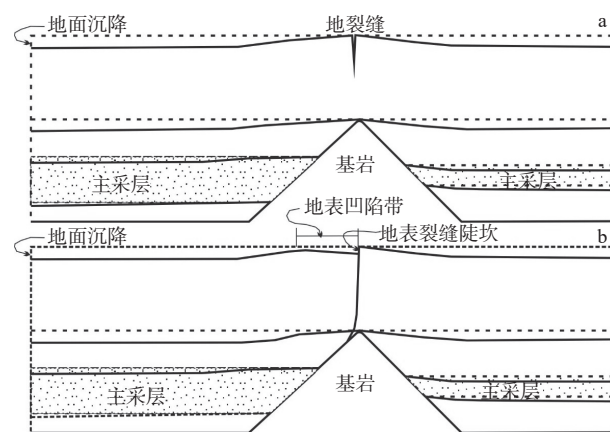
(a) Bedrock buried-hill type; (b) Buried terrace type; (c) Karst collapse type; (d) Soil layer structure difference type; (e) Comprehensive groundwater exploitation type

2.4.2 地裂缝演化的动力学过程

(1) 基岩潜山型地裂缝演化的 4 个动力学过程

在苏锡常地面沉降、地裂缝研究的基础上,以基岩潜山型地裂缝为研究重点,识别出地裂缝演化的 4 个动力学过程,揭示出地裂缝发展的时空演化规律。①地下水开采导致的地面沉降、逐渐扩展阶段(压)。根据常州分层标监测数据表明,前期沉降以主采层压缩为主,后期以弱透水层固结为主,为地裂缝形成提供了前提。②隐伏基岩潜山部位至地表拉应变增大、出现拉张破坏阶段(拉)。随着地下水位的继续下降,受含水砂层在隐伏山坡部位变薄直至尖灭的影响,伴随区域沉降漏斗及差异沉降产生的应力应变传导到基岩潜山附近,在潜山地表附近形成拉张应力集中区,地表出现初始破坏(图 16a),形成拉张裂缝。③拉张裂缝转化为剪切破坏、并继续向下扩展阶段(剪)。裂缝发展到一定深度后,拉张裂缝两侧土体的力学联系消失、变形出现不协调,在裂缝尖端附近产生明显的剪切应力,裂缝方向发生明显偏转,同时地裂缝两侧在地表处出现明显的垂向相对位移,成为“小断层”,并在地表形成高差达到 30~50cm 的断层陡坎,断层下盘形成 10~30m 的坳陷区(图 16b),部分裂缝最终延伸至潜

山顶部或第 II 承压含水层,由此地裂缝的形成过程已从初期的拉张裂缝转变为剪切裂缝。④地下水禁采、地面反弹、地裂缝稳定阶段(弹)。地面沉降区域稳定,部分地区出现地面回弹,随之地裂缝活动缓慢、逐渐趋于稳定。对地裂缝演化动力学过程的深入理解,有助于更好地评估和预测地裂缝的形



a—拉张破坏阶段; b—剪切破坏阶段

图 16 基岩潜山型地裂缝成因示意图

Fig. 16 Genesis diagram of buried hill-type earth fissures in buried bedrock

(a) Tensile-damage stage; (b) Shear-damage stage

成和演变过程。

(2) 基岩潜山地裂缝拉张-剪切的力学破坏机制

以无锡光明村基岩潜山地裂缝为背景, 建立基于分布式光纤监测技术的“采水型”地裂缝物理试验模型(图 17)。试验结果表明, 土体内部拉应力在垂直方向上, 峰值随深度增加而减少, 分布范围随着深度增加而变小, 地裂缝发育从浅部向深部逐渐发育; 水平方向上, 地裂缝与拉压应力突变位置存在较好的对应关系, 土体拉张应力集中区对应于地裂缝发育的多发位置(图 18), 潜山区地裂缝发育程度均大于平坦区域。同时监测结果发现水位下降至含水层顶板时, 地裂缝开始产生, 这也充分验证了苏南地区地裂缝的形成演化规律及拉张-剪切耦合的力学破坏机制。地下水开采是地裂缝形成的诱因, 而潜山形态控制了地裂缝的进一步演化, 其形态位置对地表差异性沉降起到控制作用, 潜山走向与地裂缝展布基本一致, 存在很强的对应关系。



图 17 大型地裂缝物理模型系统 (俯视图与正面图)
Fig. 17 Physical modeling system for large-scale earth fissures (top and front views)

2.4.3 地裂缝的触发机制和临界条件

苏锡常地区地裂缝的触发机制在于地下水开采引起土层的应力变化, 地表附近土体发生拉裂破坏, 形成初始拉张裂缝; 在裂缝端部产生局部应力集中, 初始裂缝扩展, 从而形成实际意义上的地裂缝。

(1) 拉张裂缝的临界条件

不同学者将“断裂韧度”的概念应用于地裂缝发生临界条件的研究(Zhang et al., 2017; Gong et al., 2020)。地裂缝应力应变模拟结果显示, 抽水后, 地层表面可形成较浅的拉伸区域, 进一步验证了拉张应力集中部位是地裂缝发育的最危险区域。

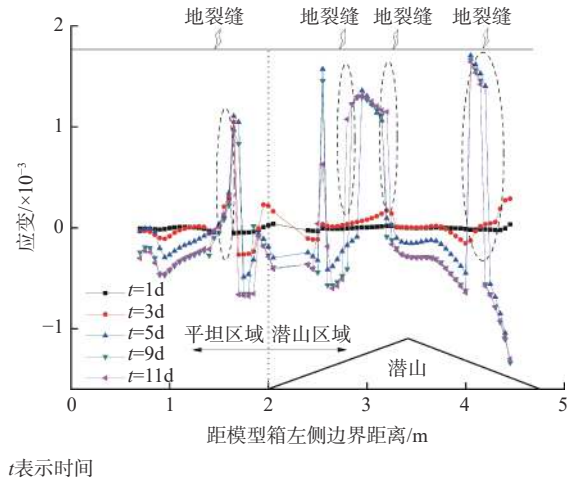


图 18 拉张应力分布与地裂缝分布

Fig. 18 Tensile-stress distribution and earth fissures distribution

当拉应力值 σ_x 达到土体的抗拉强度 σ_t 时 ($\sigma_x > \sigma_t$) 可形成裂缝(图 19); 之后土体中存在显著的不连续面, 随着水位的下降, 拉张区域向深部发展, 在初始破裂面端部发生局部应力集中, 当应力强度因子 K_I 达到土体的断裂韧度 K_{Ic} ($K_I = K_{Ic}$) 时, 裂缝不断向下扩展, 形成多条平行裂纹(图 19; Zhang et al., 2017)。

(2) 拉张裂缝转化为剪切裂缝的触发机制

初始裂缝形成后, 随着水位的下降, 拉张裂缝继续向下扩展, 在达到一定深度后, 自重压应力超过水平拉应力成为主应力时, 剪切应力成为主导, 当剪切应力 τ_{xy} 大于土体抗剪强度 σ_c ($\tau_{xy} > \sigma_c$) 时, 扩展方向发生偏转, 形成剪切裂缝, 出现明显的台阶和错动。

3 区域及场地尺度的模拟及预测

为有效防控苏锡常地区地面沉降与地裂缝的发生, 降低其引发的经济损失, 保障重大线性工程的安全, 亟需准确地预测其发展趋势, 数值模拟无疑是最有效的手段。目前苏锡常区域地面沉降的模拟研究面临众多尚需解决的难题。江苏省地质调查研究院联合南京大学自 2000 年起持续开展区域地面沉降与地裂缝的数值模拟研究, 首先实现了仅考虑土体垂向一维变形的大区域地面沉降数值模型的构建, 随后建立了区域三维地面沉降模型; 同时为进一步刻画地裂缝发展过程, 建立场地尺度地裂缝三维预测模型, 开展了单条、多条地裂缝场景下的数值模拟, 开启了地裂缝量化预测的一扇窗。

3.1 区域地面沉降的数值模拟

2002 年, 研究团队利用苏锡常地区大区域空间

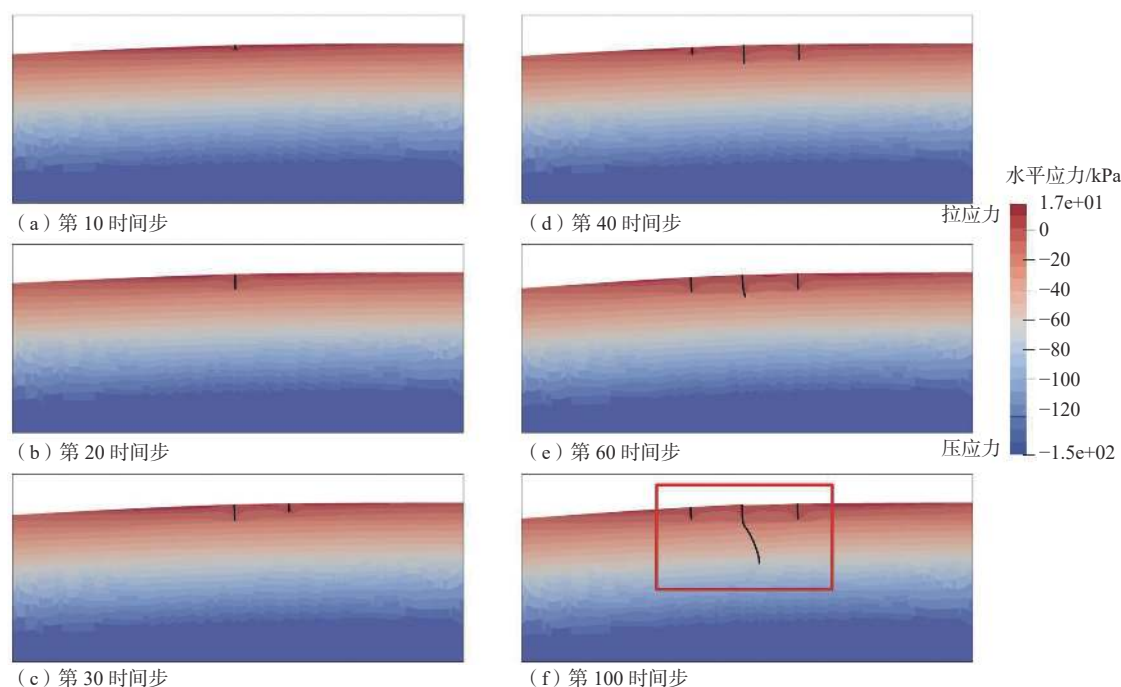


图 19 地裂缝模拟结果 (Zhang et al., 2017)

Fig. 19 Earth fissure simulation results (Zhang et al., 2017)

(a) Time step 10; (b) Time step 20; (c) Time step 30; (d) Time step 40; (e) Time step 60; (f) Time step 100

尺度的真三维变系数地下水流与地面沉降耦合模型, 刻画出复杂地质结构地下水渗流和地面沉降过程; 在数值模型基础上, 对地面沉降未来发展变化趋势进行预测, 实现大区域范围内巨厚第四纪松散层的地面沉降模拟和预测预警。

此次建立的地面沉降模型包括基于不同本构关系的三维变系数非线性地下水流模型和一维垂向变系数的非线性沉降模型。该模型充分考虑了含水层和弱透水层的非线性变形和蠕变, 基于修正的 Merchant 模型建立了可以刻画包括弹性、弹塑性、黏弹性、黏弹-塑性等多种变形特征的变系数区域地面沉降模型(叶淑君, 2004; Shi et al., 2008; 薛禹群等, 2008; Ye et al., 2011)。根据孔隙比随时间的变化特征, 将不同土层地下水渗流、变形等参数进行了非线性耦合(叶淑君, 2004; 薛禹群等, 2008), 模拟出复杂地质结构地下水渗流和地面沉降过程, 实现了大区域变系数三维水流模型与地面沉降模型的真实耦合。

此外, 从数学领域引入一种新的有限单元法——多尺度有限单元法(MsFEM; 叶淑君, 2004)求解大型三维地下水流模型, 通过创新算法, 突破传统有限单元法一个单元只能反映一种岩性的限制, 在同一单元能反映不同的岩性(如渗透系数), 大量压缩

模拟计算单元总数, 在大幅减少计算量同时保证了计算精度, 解决了大范围复杂地质条件地面沉降模拟三维求解问题。研究团队率先攻克了含水层和弱透水层的非线性变形模拟, 解决了土层地下水渗流、变形与渗透系数、压缩系数等参数同步耦合的难题, 推动中国地面沉降模拟研究居于国际领先地位。

3.2 区域三维地面沉降-地裂缝数值模拟

国内区域性地面沉降数值模拟基本都假定土的变形是垂向一维的, 忽略了水平方向的变形(叶淑君, 2004; Shi et al., 2008; 薛禹群等, 2008; Ye et al., 2011)。不少学者在理论上对比研究了考虑和不考虑水平位移对地下水位和土层沉降的影响, 结果表明忽略水平位移往往使沉降计算结果偏大(Helm, 1994)。对地裂缝模拟而言, 水平变形更是必不可少的。因此地面沉降模拟需要由考虑垂向一维变形转向三维变形探索。

3.2.1 基于扩展有限元法的区域三维地层形变模拟与地裂缝区域预测

根据抽水作用下土骨架的平衡条件和水流连续性条件, 考虑土体变形的非线性和非弹性特性以及渗透系数的变化, 建立区域地下水开采条件下全耦合三维地层变形模型。

地裂缝的形成是一个从无到有、从小到大的过

程,地裂缝出现之前其位置和扩展方向均是未知的,因此常规有限单元法难以模拟地裂缝。扩展有限元法不需要从网格层面考虑结构内部的不连续,而是通过在单元形函数中富集增强函数作为受裂纹切割的单元位移的不连续部分,以此来逼近真实不连续位移场。

通过建立的区域三维形变数值模型,模拟地下水开/禁采条件下含水系统的应力和应变分布特征。开采地下水过程中可在含水系统中引起拉应变,但由于土层自重应力随深度而增加,拉应变并不必然使土体出现拉应力(Zhang et al., 2018)。只有在拉应变足够大、原有自重应力较小处才会出现拉应力,当拉应力达到土体的抗拉强度时土体产生拉裂破坏。因此,抽水时地裂缝通常起始于地表土体的拉裂破坏,由此可识别出地表水平拉应力集中分布区,划分地裂缝易发区,模拟结果与实际地裂缝分布情况高度吻合,从而实现了苏南地区地裂缝的精准预测。

3.2.2 基于区域-场地双尺度有限元耦合界面元法的典型地裂缝演变模拟与预测

为更直观地刻画地裂缝地质界面上的连续-非连续介质的活动特征,针对传统三维有限元节点间不可分离的不足,将界面元引入到地裂缝三维模拟研究中,研究团队创新性提出区域-场地双尺度有限元耦合界面元法,建立典型地裂缝三维形变数值模拟模型,量化再现地裂缝在过量开采地下水条件下的发生、发展演化过程。

在苏锡常区域三维地下水流和地面沉降模型基础上局部嵌套地裂缝发育区的三维水流和地质力学模型,采用有限元与界面元联合求解的数值方法,更直观准确地刻画出地裂缝地质界面上的连续-非连续介质的活动特征。通过将上述数学模型和数值方法应用于典型地裂缝发育区——无锡光明村,实现了野外实际地裂缝的数值模拟,模拟结果包括位移、应力、应变、地裂缝张开和滑动量,实质性的推动了对地裂缝发育过程和机制的实质性认识。数值模拟结果显示,光明村的地裂缝主要是由拉张应力和剪切应力造成的(Ye et al., 2018),基岩潜山山脊上不均匀的垂向压缩导致两侧沉积层发生相反方向的旋转,拉动山脊顶部沉积物产生拉张应力区,形成裂缝(图 20, 图 21)。由此证实无锡地裂缝是在地表触发后、向下发育,而不是从深部触发向上发育,为地裂缝发育概念模型的建立奠定了基础。

野外地裂缝常常多条发育,如光明村实发现有

3条地裂缝平行发育。在前期研究的基础上,进一步开展过量开采地下水引发的多条地裂缝的数学模型和数值模拟研究,成功模拟出无锡光明村多条地裂缝的发育和发展过程(Li et al., 2021),揭示出多裂缝的产生机制,实现了区域采水型地裂缝模拟预测、预警及其工程应用。在此基础上研究团队构建了一套地裂缝数值模拟方法体系,其中数学模型涵盖双尺度数学模型和连续-非连续介质数学模型,数值方法联合运用有限元和界面元。

4 地面沉降防控措施

4.1 实施多期次地面沉降地裂缝调查评价

为有效控制地面沉降的发展,从20世纪80年代起,江苏省地质调查研究院(地调院)将水工环的工作重点逐渐向以防控地面沉降研究进行转变,至90年代末完成了多个地裂缝专项勘查。2000年起,地调院持续开展地面沉降专项防治工作。江苏、浙江、上海三地密切合作,在全国率先形成“三模一网一专”的成果,系统对苏锡常地区地面沉降以及地裂缝的分布发育规律、形成机制进行调查,开展地裂缝易发区预测,为地裂缝防灾、减灾提供了科学指导。

2006年以后,地面沉降防控工作开始转向风险管控研究和常态化监测工作(于军等, 2006; 于军和武健强, 2008; 武健强等, 2009; 李伟和武健强, 2015),以政府管理需求为先导,开展地面沉降防治科学研究,逐步实现技术研究向服务行政管理研究的转变。

4.2 构建多技术融合的地面沉降、地裂缝监测体系

20世纪80年代,苏锡常地区开始系统建立地下水、地面沉降动态监测网络。通过实施地面沉降调查与监测工程项目,系统开展地面沉降监测技术方法的融合研究。2014年,分布式光纤监测技术引入到江苏省地面沉降、地裂缝的监测,通过自主研发多项感测光缆和传感器,建立地质钻孔全断面光纤监测体系,实现了对地质体分布式、精细化监测,推动了地裂缝监测由二维进入三维。2017年江苏省率先开展省域全覆盖的常态化高分辨率InSAR监测,为地面沉降防控提供科学、详细的数据支撑。

截至2022年底,苏锡常地区已建立了以分布式光纤监测为特色的多种技术方法融合的“天-空-地”一体化、地下水-地面沉降地裂缝协同的监测体系(图 22),包含全域覆盖的高分辨率InSAR、

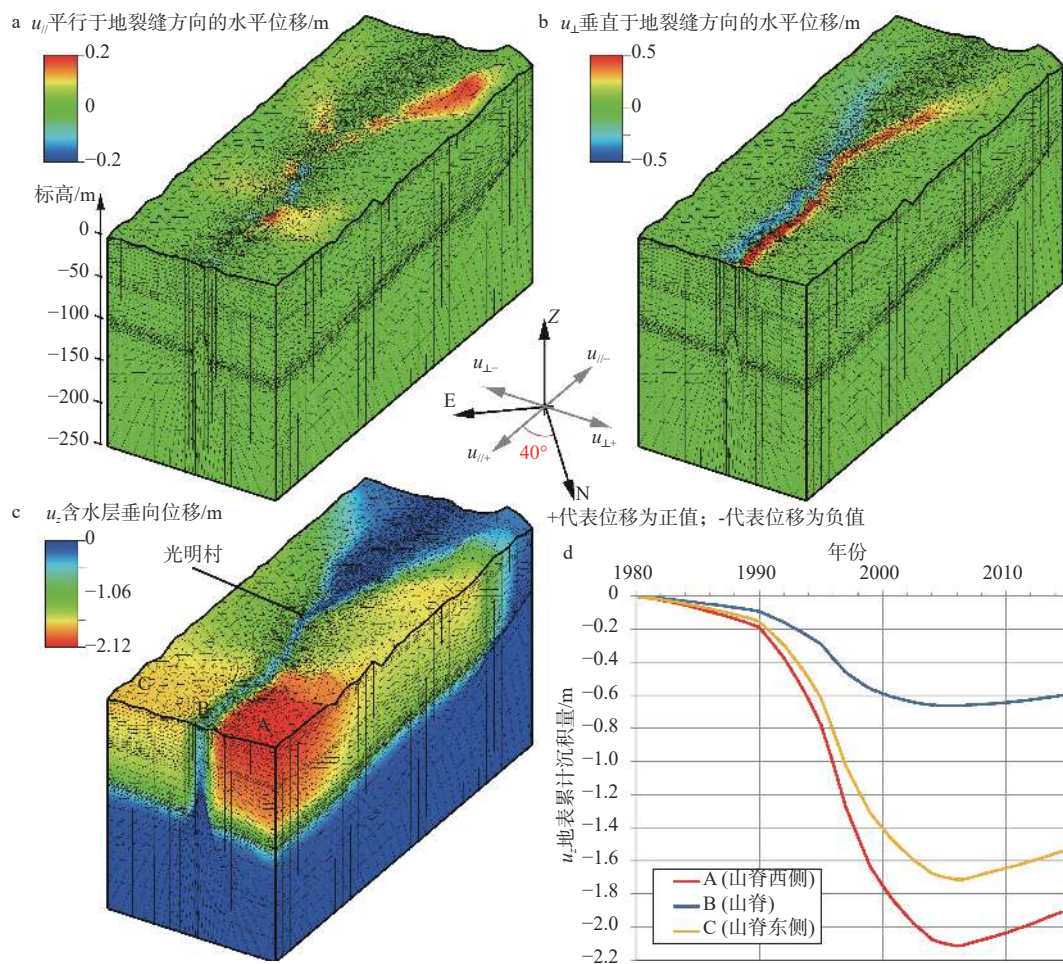
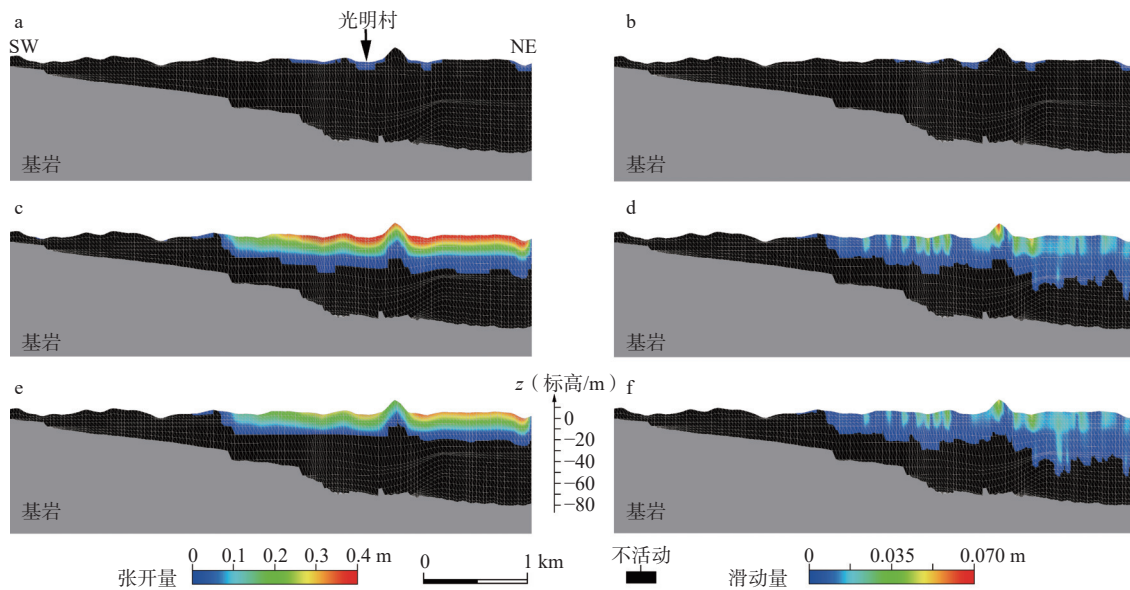


图 20 无锡光明村地裂缝数值模型三维位移图 (Ye et al., 2018)

Fig. 20 Three-dimensional displacement diagram of numerical modeling of Guangming village earth fissure, Wuxi (Ye et al., 2018)



a、c、e—地裂缝张开过程(1994, 2004, 2015); b、d、f—地裂缝滑动过程(1994, 2004, 2015)

图 21 地裂缝张开与滑动过程的模拟结果 (Ye et al., 2018)

Fig. 21 Simulation results of earth fissure opening and sliding processes

(a, c, e) Earth-fissure opening processes (1994, 2004, 2015); (b, d, f) Earth-fissure sliding processes (1994, 2004, 2015)

GPS 监测墩 180 座(含固定站 16 座)、基岩标 16 座, 分层标 6 组, 地裂缝监测点 5 处(自动化 2 处), 长期监测的水准线路 320 km, 地面沉降光纤监测孔

28 个, 地裂缝光纤监测带 8 条(图 23), 实现了地面沉降-地裂缝多场、多尺度、立体化的监测, 引领了地面沉降、地裂缝监测技术的发展。

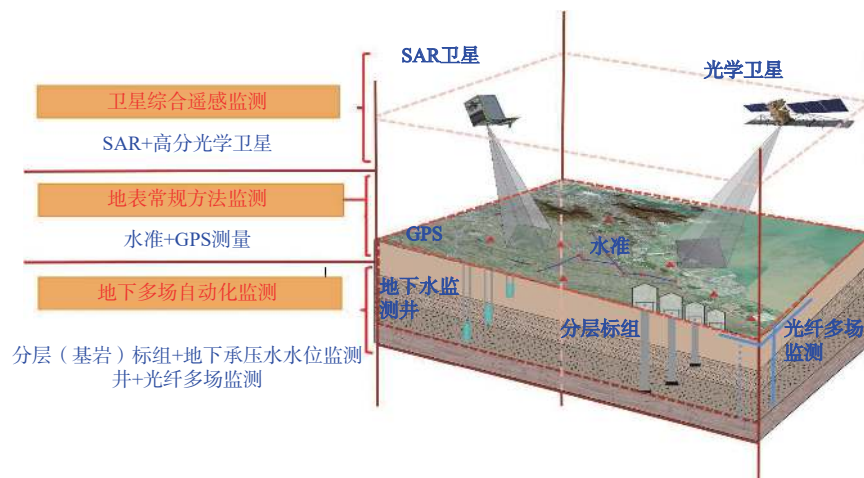


图 22 “天-空-地”一体化地面沉降地裂缝监测体系

Fig. 22 Integrated “satellite-ground-subsurface” monitoring system for land subsidence and earth fissure

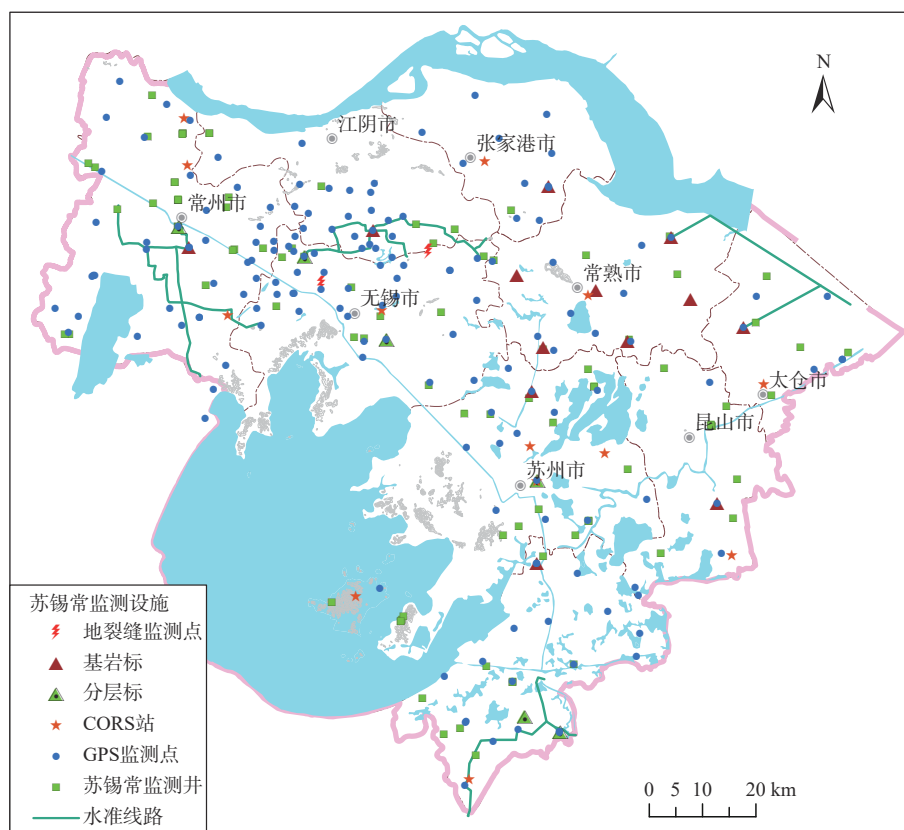


图 23 地面沉降监测设施分布示意图

Fig. 23 Schematic illustration of main land subsidence monitoring facilities in Suzhou-Wuxi-Changzhou region

4.3 实施综合管控策略

4.3.1 地下水资源管理

以地面沉降、地裂缝成因机制创新研究成果为基础, 2000 年在全国首创通过江苏省人民代表大会

(人大)立法, 禁采深层地下水防控苏锡常地区地面沉降。2000 年 8 月, 江苏省人大出台了《关于在苏锡常地区限期禁止开采地下水的决定》, 至 2005 年 10 月底, 全面完成禁采任务。2013 年, 江苏省人民

政府批复了《江苏省地下水压采方案(2014—2020)》,苏中、苏北地区持续推进封井压采,在全国率先实施地下水取水总量和水位“双控”制度防控地面沉降;2017年基于地面沉降风险理论,发布全国首个省级地面沉降控制区划分方案。这对浙江(2004年)、天津(2007年)、上海(2013年)、河北(2014年)等地面沉降严重省份先后出台地下水超采区禁限采规定起到了示范作用。

4.3.2 专项灾害防治规划

以政府管理需求为先导,以管理成效为目标,进行政策顶层设计,编制各项专项防治规划,确保江苏省地面沉降控制目标的实现,保障区域经济社会可持续发展和重大工程安全。根据《国务院关于加强地质灾害防治工作的决定》(国发〔2011〕20号)精神和全国重点地区地面沉降联防联控工作会议要求组织编制了《全国地面沉降防治规划(2011—2020年)》。在全国地面沉降总体规划指导下,江苏省编制了《江苏省地面沉降防治规划》《江苏省地质灾害防治规划》等。苏州、无锡、常州3市又分别编制了该市的地质灾害防治规划,对地面沉降、地裂缝等地质灾害提出相应的控制目标。

4.3.3 建立部门协同、区域联动的联防、联控机制

苏锡常地区创新区域地面沉降防控管理模式。在原国土资源部推动下,2004年江苏省、浙江省和上海市率先在全国建立了长三角地面沉降监测联动制度,2012年12月建立了长三角地面沉降防治联动制度,共同编制了全国首个区域地面沉降防治规划及控制区划分方案,2018年将安徽省纳入区域合作协议,不断提升地面沉降区域一体化防控能力。通过突破行政区界限,推动了国内重点地面沉降区区域联防联控机制的形成,为全国地面沉降防控提供了示范。

在江苏省内,推动省厅建立了水利、住建、交通等多部门联合的地面沉降防控机制,共同编制《江苏省地面沉降防治规划》和《江苏省地面沉降控制区划分方案》,明确各部门防控职责,实现信息共享,协同推进地面沉降防治相关制度的落地实施。

5 展望

苏锡常地区地面沉降的诱发因素——深层地下水过量开采已得到有效管控,地面沉降已处于其生命周期的稳定—反弹期,面对新形势,地面沉降研

究需重点关注以下3方面的问题。

(1)开展城市地质安全背景下地面沉降、地裂缝灾害风险动态的评估与管控。一是要按照演化的思维科学评估已稳定的深层地下水开采诱发地面沉降、地裂缝的风险,二是考虑城市建设尤其是地下空间开发可能诱发的工程性地面沉降风险,三是探索开展地面回弹对城市重大工程安全的影响评估。因此下一步需重点针对城市规划区、重大工程建设区等区域,结合国土空间规划与用途,探索建立地面沉降灾害风险动态评估更新机制,掌握地面沉降风险底数及动态变化情况,科学制定风险防控措施,实现对潜在沉降风险区域的及早预警和分区、分层精准防控。

(2)研究新时期优质地下水资源保护与利用措施。苏锡常地区地面沉降防控经历了限采、禁采2个阶段。历时20年的禁采工作,地下水资源得到有效涵养和恢复,地面沉降及地裂缝得到有效的控制。地下水禁采无疑是控制地面沉降最有效的措施,但地下水资源是可以循环更新的,持续禁采会造成优质资源的浪费,特别是苏锡常沿江地段,地下水资源补给条件良好,可更新能力强,水质优良。因此面对地面沉降的现状形势,如何充分发挥地下水的资源属性,实现地下水优水优用,需要进一步加强科学研究,基于地下水可更新能力的分析,分区提出地下水管理措施,实现地下水资源合理开发和地面沉降统筹防控。

(3)加强浅层地下水开采引发的地面沉降的防控。由于城市地下空间开发强度越来越大,建设过程中基坑排水引发的地面沉降越发严重,造成居民房屋与市政管线破坏,已成为威胁城市安全的主要灾害之一。平原区水产养殖开采浅层地下水引发的沉降区不断出现。因此深化机理研究,形成符合地方条件的地下工程沉降防控技术;借鉴深层地下水“双控”的管理方式,通过科学评价划定浅层地下水的水位控制红线,提出浅层地下水的水位、水量双控措施,实现地面沉降的有效控制。

6 结论

回顾苏锡常地区20多年的地面沉降防控工作,通过多方联动与多措并举,苏锡常地区已率先退出严重沉降区,地面沉降、地裂缝防控工作取了阶段性胜利,为国内外此类问题的解决积累了宝贵

的经验。

(1) 苏锡常地区地面沉降呈现“起势晚、势头猛、破坏烈”的特点,其发生、发展具有明显的阶段性,可划分为地面沉降产生期、快速发展期、发展趋缓期、滞后期及回弹期5个生命过程。地面沉降发展与地下水开采密切相关,其地层变形主要来自于地下水开采导致的含水层和弱透水层的压密释水,在沉降阶段主采含水砂层及相邻隔水层为沉降主要贡献层。

(2) 地裂缝是地面沉降发展到一定阶段后所产生的次生地质灾害,其空间展布及成灾时间与地下水水位、地面沉降、基岩起伏变化以及土层结构差异等因素密切相关。通过对地裂缝的时空演变规律的深化认识,提出地裂缝孕灾的拉张-剪切耦合破裂机制,识别出其触发机制和临界条件,地裂缝生命周期可概括为压-拉-剪-弹的力学机制。

(3) 分布式光纤监测技术是获取地面沉降、地裂缝三维形变场的有效手段,苏锡常地区大范围分布式光纤监测的实施,实现了地质场分布式、精细化监测,推动地裂缝监测由二维进入三维;同时建立了以地质钻孔全断面光纤监测为特色,多种技术方法融合的“天-空-地”立体化、地下水-地面沉降地裂缝协同的监测体系,为地面沉降防控提供科学、详细的数据支撑。

(4) 从实现地面沉降、地裂缝灾害有效预测、预警目标出发,结合地面沉降、地裂缝孕灾机理,创新区域-场地双尺度有限元耦合界面元法,成功实现了三维复杂地质环境条件下地层形变特征及地裂缝生成和扩展的力学机制模拟,为地面沉降、地裂缝易发区精准圈定与防控提供了解决路径。

(5) 苏锡常地区地面沉降以及地裂缝是由于地下水不合理开采导致的,通过实施一系列科学的地下水资源管理策略,已经快速有效地遏制了地面沉降以及地裂缝灾害的发展,为中国其他省(市)地面沉降防控与地下水资源管理起到了示范作用。

References

- BAWDEN G W, THATCHER W, STEIN R S, et al., 2001. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects[J]. *Nature*, 412(6849): 812-815.
- BRAMBATI A, CARBOGNIN L, QUAIA T, et al., 2003. The lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence[J]. *Episodes*, 26(3): 264-268.
- CHEN C X, PEI S P, JIAO J, 2003. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 11(2): 275-287.
- Department of Land and Resources of Jiangsu Province, 2012. Geological disaster prevention and control planning (2011-2020) in Jiangsu province[EB/OL]. (2012-04-06)[2024-03-24]. <https://zrzy.jiangsu.gov.cn/gtxxgk/nrglIndex.action?type=2&messageID=2c9082547d5e4398017d5ed727f10008>. (in Chinese)
- GONG X L, GENG J S, SUN Q, et al., 2020. Experimental study on pumping-induced land subsidence and earth fissures: a case study in the Su-Xi-Chang region, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(9): 4515-4525.
- GUO H P, LI W P, WANG L Y, et al., 2021. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(3): 162-171. (in Chinese with English abstract)
- GUO K Y, GUO S Q, YU J, et al., 2005. Groundwater resources and geohazards surveying and evaluation in Yangtze Delta area[R]. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, and Jiangsu Geological Survey and Research Institute, Shanghai Institute of Geological Survey, Geological Environment Monitoring Station of Zhejiang Province, Geological Survey of Zhejiang Province. (in Chinese)
- HELM D C, 1994. Horizontal aquifer movement in a Theis-Thiem confined system[J]. *Water Resources Research*, 30(4): 953-964.
- HERRERA-GARCÍA G, EZQUERRO P, TOMÁS R, et al., 2021. Mapping the global threat of land subsidence[J]. *Science*, 371(6524): 34-36.
- HU Z Q, XU X L, ZHAO Y L, 2012. Dynamic monitoring of land subsidence in mining area from multi-source remote-sensing data – a case study at Yanzhou, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(17): 5528-5545.
- JIANG L M, LIN H, MA J W, et al., 2011. Potential of small-baseline SAR interferometry for monitoring land subsidence related to underground coal fires: Wuda (northern China) case study[J]. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 257-268.
- Jiangsu Provincial People's Government, 2015. The approval of groundwater compression exploitation plan (2014-2020): Su Zhengfu [2015] No. 19[EB/OL]. (2015-03-16). https://www.jiangsu.gov.cn/art/2015/3/16/art_46143_2542910.html. (in Chinese)
- LI C J, TANG X M, MA T H, 2006. Land subsidence caused by groundwater exploitation in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 14(8): 1652-1665.
- LI W, WU J Q, 2015. Research on monitoring method system of land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. *Global Geology*, 34(3): 862-869. (in Chinese with English abstract)
- LI Y T, TEATINI P, YU J, et al., 2021. Aseismic multifissure modeling in unfaulted heavily pumped basins: mechanisms and applications[J]. *Water Resources Research*, 57(10): e2021WR030127.
- LI Z, LUO Z J, WANG Q, et al., 2019. A three-dimensional fluid-solid model, coupling high-rise building load and groundwater abstraction, for prediction of regional land subsidence[J]. *Hydrogeology Journal*, 27(4): 1515-1526.

- LIU C, YUAN X J, ZHU J Q, 2004. Earth fissures in Su-Xi-Chang[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- LIU H P, 2010. The study on the land subsidence with the affect of high-rise buildings in Tianjin Binhai New Area[D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese with English abstract)
- LIU M Y, ZHANG Q Q, GONG X L, et al., 2022. Study on soil deformation characteristic and the life process of land subsidence in Changzhou Area of Jiangsu province[J]. *Shanghai Land & Resources*, 43(4): 50-55, 72. (in Chinese with English abstract)
- LUO Z J, ZHANG X, TIAN X W, 2018. Prediction and early warning of Cangzhou land subsidence disaster[J]. *Journal of Engineering Geology*, 26(2): 365-373. (in Chinese with English abstract)
- Ministry of Land and Resources, Ministry of Water Resources, 2012. National plan for prevention and control of land subsidence (2011-2020)[EB/OL]. (2012-02-22)[2024-03-24]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201810/t20181030_2261387.html. (in Chinese)
- NELSON F E, ANISIMOV O A, SHIKLOMANOV N I, 2001. Subsidence risk from thawing permafrost[J]. *Nature*, 410(6831): 889-890.
- NOTTI D, MATEOS R M, MONSERRAT O, et al., 2016. Lithological control of land subsidence induced by groundwater withdrawal in new urban areas (Granada Basin, SE Spain). Multiband DInSAR monitoring[J]. *Hydrological Processes*, 30(13): 2317-2331.
- PARSONS T, 2021. The weight of cities: Urbanization effects on Earth's subsurface[J]. *AGU Advances*, 2(1): e2020AV000277.
- SAYYAF M, MAHDAVI M, BARANI O R, et al., 2014. Simulation of land subsidence using finite element method: Rafsanjan plain case study[J]. *Natural Hazards*, 72(2): 309-322.
- SHI X Q, XUE Y Q, WU J C, et al., 2006a. A study of soil deformation properties of the groundwater system in the Changzhou area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 33(3): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- SHI X Q, XUE Y Q, ZHANG Y, et al., 2006b. Creep model of Changzhou silty clay[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 34(5): 16-18, 70. (in Chinese with English abstract)
- SHI X Q, XUE Y Q, WU J C, et al., 2007. Uniaxial compression tests for creep model of saturated sand in Changzhou[J]. *Journal of Engineering Geology*, 15(2): 212-216. (in Chinese with English abstract)
- SHI X Q, WU J C, YE S J, et al., 2008. Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai city, China[J]. *Engineering Geology*, 100(1-2): 27-42.
- SHI X Q, FENG Z X, YAO B K, et al., 2014. Study on the deformation characteristics of soil layers after banning groundwater pumping in Su-Xi-Chang area[J]. *Quaternary Sciences*, 34(5): 1062-1071. (in Chinese with English abstract)
- State Council, 2011. Decision on strengthening the prevention and control of geological hazards: Guo Fa [2011] No. 20[EB/OL]. (2011-06-13)[2024-03-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2011-06/17/content_2744.htm. (in Chinese)
- SUN X H, PENG J B, CUI X M, et al., 2016. Relationship between ground fissures, groundwater exploration and land subsidence in Taiyuan basin[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 27(2): 91-98. (in Chinese with English abstract)
- The Standing Committee of Jiangsu Provincial People's Congress, 2021. Decision on prohibiting the exploitation of groundwater in the Suzhou-Wuxi Changzhou area for a limited period of time: bulletin of the standing committee of Jiangsu provincial people's congress. [2000] No. 5[EB/OL]. (2021-10-08)[2024-03-24]. https://www.jsrd.gov.cn/qwfb/sjfg/202110/t20211008_532359.shtml. (in Chinese)
- WANG G Y, YU J, WU S L, et al., 2009. Land subsidence and compression of soil layers in Changzhou Area[J]. *Geology and Exploration*, 45(5): 612-620. (in Chinese with English abstract)
- WANG G Y, YOU G, ZHU J Q, et al., 2016. Earth fissures in Su-Xi-Chang region, Jiangsu, China[J]. *Surveys in Geophysics*, 37(6): 1095-1116.
- WU J Q, WU S L, LI W, et al., 2009. Construction of risk assessment index system for land subsidence disasters in the Suzhou-Wuxi-Changzhou region[C]//Proceedings of the 2009 academic annual conference of the Chinese geological society. Beijing: Chinese Geological Society: 277-278. (in Chinese)
- WU J Q, WU S L, MIN W, et al., 2014. Review on recent progress of land subsidence control in Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. *Journal of Geology*, 38(2): 319-323. (in Chinese with English abstract)
- XUE Y Q, ZHANG Y, YE S J, et al., 2003. Land subsidence in China and its problems[J]. *Quaternary Sciences*, 23(6): 585-593. (in Chinese with English abstract)
- XUE Y Q, WU J C, ZHANG Y, et al., 2008. Simulation of regional land subsidence in the southern Yangtze Delta[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(6): 808-825.
- XUE Y Q, 2012. Discussion on groundwater overexploitation and ground settlement[J]. *Ground Water*, 34(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- YAN X X, GONG S L, ZENG Z Q, et al., 2002. Relationship between building density and land subsidence in Shanghai urban zone[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 29(6): 21-25. (in Chinese with English abstract)
- YE S J, 2004. Study on the regional land subsidence model and its application[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English abstract)
- YE S J, XUE Y Q, 2005. Stress-strain analysis for storage coefficients and vertical hydraulic conductivities of aquitards in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 26(2): 256-260. (in Chinese with English abstract)
- YE S J, XUE Y Q, ZHANG Y, et al., 2005. Study on the deformation characteristics of soil layers in regional land subsidence model of Shanghai[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 27(2): 140-147. (in Chinese with English abstract)
- YE S J, XUE Y Q, WU J C, et al., 2011. Regional land subsidence model embodying complex deformation[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Water Management*, 164(10): 519-531.
- YE S J, FRANCESCHINI A, ZHANG Y, et al., 2018. A novel approach to model earth fissure caused by extensive aquifer exploitation and its application to the Wuxi Case, China[J]. *Water Resources Research*, 54(3): 2249-2269.
- YU J, WANG X M, SU X S, et al., 2004. The mechanism analysis on ground fissure disaster formation in Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 236-241. (in Chinese with English abstract)

English abstract)

- YU J, WANG X M, WU J Q, et al., 2006. Characteristics of land subsidence and its remedial proposal in Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(2): 179-184. (in Chinese with English abstract)
- YU J, WU J C, YE S J, et al., 2007. Research on nonlinear coupled modeling of land subsidence in Suzhou, Wuxi and Changzhou areas, China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 34(5): 11-16. (in Chinese with English abstract)
- YU J, WU J Q, 2008. Preliminary research on risk evaluation management model of land subsidence in Su-Xi-Chang region[J]. *Jiangsu Geology*, 32(2): 113-117. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, WU J C, XUE Y Q, et al., 2017. Fully coupled three-dimensional nonlinear numerical simulation of pumping-induced land movement[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76(16): 552.
- ZHANG Y, YU J, GONG X L, et al., 2018. Pumping-induced stress and strain in aquifer systems in Wuxi, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 26(3): 771-787.
- ZHU J Q, JIAO X, YU J, et al., 2008. Evaluation of earth fissures based on GA-ANN coupling model in the Suzhou-Wuxi-Changzhou area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 35(4): 106-110. (in Chinese with English abstract)
- ZHU J Q, ZHANG W Q, YU J, et al., 2016. Hazards of soil cracking and experimental research[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press. (in Chinese)
- ZHU L, GONG H L, LI X J, et al., 2024. Research progress and prospect of land subsidence[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 51(4): 167-177. (in Chinese with English abstract)
- 江苏省人民政府, 2015. 关于江苏省地下水压采方案(2014-2020年)的批复: 苏政复[2015]19号[EB/OL]. (2015-03-16)[2024-03-24]. https://www.jiangsu.gov.cn/art/2015/3/16/art_46143_2542910.html.
- 李伟, 武健强, 2015. 苏锡常地区地面沉降监测方法体系建设[J]. *世界地质*, 34(3): 862-869.
- 刘聪, 袁晓军, 朱锦旗, 2004. 苏锡常地裂缝[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 刘寒鹏, 2010. 天津滨海新区高层建筑荷载作用下地面沉降研究[D]. 西安: 长安大学.
- 刘明遥, 张其琪, 龚绪龙, 等, 2022. 江苏常州地区地面沉降变形特征与生命过程研究[J]. *上海国土资源*, 43(4): 50-55, 72.
- 骆祖江, 张鑫, 田小伟, 2018. 沧州市地面沉降灾害预测预警[J]. *工程地质学报*, 26(2): 365-373.
- 庞炳乾, 宋默, 徐兴源, 等, 1984. 常州市水文地质工程地质环境地质综合勘察报告(1:50000)[R]. 常州: 江苏省地矿局第1水文地质工程地质大队.
- 施小清, 薛禹群, 吴吉春, 等, 2006a. 常州地区含水层系统土层压缩变形特征研究[J]. *水文地质工程地质*, 33(3): 1-6.
- 施小清, 薛禹群, 张云, 等, 2006b. 常州地区粉质粘土的蠕变模型[J]. *工程勘察*, 34(5): 16-18, 70.
- 施小清, 薛禹群, 吴吉春, 等, 2007. 饱和砂性土流变模型的试验研究[J]. *工程地质学报*, 15(2): 212-216.
- 施小清, 冯志祥, 姚炳奎, 等, 2014. 苏锡常地区深层地下水禁采后土层变形特征分析[J]. *第四纪研究*, 34(5): 1062-1071.
- 孙晓涵, 彭建兵, 崔向美, 等, 2016. 山西太原盆地地裂缝与地下水开采、地面沉降关系分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 27(2): 91-98.
- 王光亚, 于军, 吴曙亮, 等, 2009. 常州地区地面沉降及地层压缩性研究[J]. *地质与勘探*, 45(5): 612-620.
- 武健强, 吴曙亮, 李伟, 等, 2009. 苏锡常地区地面沉降灾害风险评价指标体系构建[C]//中国地质学会2009年学术年会论文集. 北京: 中国地质学会: 277-278.
- 武健强, 吴曙亮, 闵望, 等, 2014. 苏锡常地区地面沉降防控最新进展评述[J]. *地质学刊*, 38(2): 319-323.
- 薛禹群, 张云, 叶淑君, 等, 2003. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. *第四纪研究*, 23(6): 585-593.
- 薛禹群, 吴吉春, 张云, 等, 2008. 长江三角洲(南部)区域地面沉降模拟研究[J]. *中国科学 D辑: 地球科学*, 38(4): 477-492.
- 薛禹群, 2012. 论地下水超采与地面沉降[J]. *地下水*, 34(6): 1-5.
- 严学新, 龚士良, 曾正强, 等, 2002. 上海城区建筑密度与地面沉降关系分析[J]. *水文地质工程地质*, 29(6): 21-25.
- 叶淑君, 2004. 区域地面沉降模型的研究与应用[D]. 南京: 南京大学.
- 叶淑君, 薛禹群, 2005. 应用沉降和水位数据计算上海地区弱透水层的参数[J]. *岩土力学*, 26(2): 256-260.
- 叶淑君, 薛禹群, 张云, 等, 2005. 上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究[J]. *岩土工程学报*, 27(2): 140-147.
- 于军, 王晓梅, 苏小四, 等, 2004. 苏锡常地区地裂缝地质灾害形成机理分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(2): 236-241.
- 于军, 王晓梅, 武健强, 等, 2006. 苏锡常地区地面沉降特征及其防治建议[J]. *高校地质学报*, 12(2): 179-184.

附中文参考文献

- 郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 等, 2021. 华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J]. *水文地质工程地质*, 48(3): 162-171.
- 郭坤一, 郭盛乔, 于军, 等, 2005. 长江三角洲地区地下水资源与地质灾害调查评价[R]. 南京地质矿产研究所, 江苏省地质调查研究院, 上海市地质调查研究院, 浙江省地质环境监测总站, 浙江省地质调查院.
- 国土资源部, 水利部, 2012. 《全国地面沉降防治规划(2011—2020年)》[EB/OL]. (2012-02-22)[2024-03-24]. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/201810/t20181030_2261387.html.
- 国务院, 2011. 关于加强地质灾害防治工作的决定: 国发[2011]20号[EB/OL]. (2011-06-13)[2024-03-24]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2011-06/17/content_2744.htm.
- 江苏省国土资源厅, 2012. 《江苏省地质灾害防治规划(2011-2020年)》[EB/OL]. (2012-04-06)[2024-03-24]. <https://zrzy.jiangsu.gov.cn/gtxxgk/nrglIndex.action?type=2&messageID=2c9082547d5e4398017d5ed727f10008>.
- 江苏省人民代表大会常务委员会, 2021. 关于在苏锡常地区限期禁止开采地下水的决定: 江苏省人民代表大会常务委员会公报[2000]5号[EB/OL]. (2021-10-08)[2024-03-24]. https://www.jsrd.gov.cn/qwfb/sjfg/202110/t20211008_532359.shtml.

于军, 吴吉春, 叶淑君, 等, 2007. 苏锡常地区非线性地面沉降耦合模型研究[J]. *水文地质工程地质*, 34(5): 11-16.

于军, 武健强, 2008. 苏锡常地区地面沉降风险评价管理模型研究初探[J]. *江苏地质*, 32(2): 113-117.

朱锦旗, 焦珣, 于军, 等, 2008. 基于 GA-ANN 的苏锡常地裂缝危险性

性评价[J]. *水文地质工程地质*, 35(4): 106-110.

朱锦旗, 张卫强, 于军, 等, 2016. 土体裂缝危害及试验研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社有限责任公司.

朱琳, 宫辉力, 李小娟, 等, 2024. 区域地面沉降研究进展与展望[J]. *水文地质工程地质*, 51(4): 167-177.

获奖者简历:

朱锦旗, 江苏省地质调查研究院院长、研究员级高级工程师。2023 年获得第十八次李四光地质科学奖野外奖。先后荣获“江苏省有突出贡献的中青年专家”“江苏省五一劳动奖章”“江苏省先进工作者”等荣誉称号, 享受国务院政府特殊津贴。长期从事水文地质环境地质工作, 围绕破解制约经济社会发展的重大资源环境问题, 先后组织开展了服务城镇化进程的安全守护战、服务国家重大区域发展规划的战略攻坚战、服务生态文明建设的绿色保卫战等三大战役。主持实施的苏锡常地区地面沉降(地裂缝)防控研究, 推动苏锡常地面沉降问题在全国率先得到有效遏制; 牵头实施的国家重大战略区“综合地质调查”, 首次发现连云港地区具备建设地下水封洞库的地质条件, 支撑徐圩建设江苏首个地下大型能源储备库; 负责和指导十个设区市的城市地质调查, 推动江苏在全国率先实现设区市城市地质调查全覆盖, 夯实了城市高质量发展的底盘; 推动江苏干热岩等地热清洁能源勘查重大突破、助力江苏省国家“山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”零的突破, 为美丽江苏建设贡献地质智慧; 探索以矿地融合为特色的地质工作新模式, 为地勘单位转型发展提供示范。出版专著 6 部, 发表论文 17 篇。荣获省部级一等奖 2 项、二等奖 6 项。

