

长三角地区地面沉降灾害机制研究综述

杨迟琰

同济大学土木工程学院地下建筑与工程系 上海 200092

【摘要】：地面沉降是长三角地区最典型的缓变型地质灾害之一。在软土广布、地下水系统复杂及城市化和地下空间开发强烈叠加背景下，地面沉降已成为制约区域安全与可持续发展的重要地质环境问题。本文系统梳理了长三角地区地面沉降的发育概况、主控因素及研究进展。结果表明，区域地面沉降已逐步演变为地下水调控、工程荷载和地下空间开发共同作用下的多因素过程。当前研究仍存在主控机制识别不足、多尺度分析框架缺乏等问题。未来应加强多因素机制解析与区域—工程一体化研究，以提升地面沉降灾害防控水平。

【关键词】：地面沉降；长三角地区；主控因素；多尺度分析；风险防控

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.013

地面沉降是指在自然因素或人类工程活动作用下，地下松散岩层发生固结压缩，导致区域地面高程持续降低的缓变型地质灾害。长三角地区地势低平，第四系松散沉积层广泛发育，软土分布广、地下水系统复杂，同时城市化进程快、地下空间开发强度大，是我国地面沉降最为发育且影响最为显著的区域之一。

与滑坡、崩塌等突发性灾害不同，地面沉降具有缓慢性、隐蔽性和长期性，其危害通常表现为通过持续改变地层结构、地下水动力条件和工程系统初始状态，不断积累并放大风险。在以上海为代表的超大城市中，地面沉降已由早期以地下水开采为主导的单因素过程，逐步演变为水文地质条件、工程地质特性与高强度人类活动共同作用下的多因素耦合过程。

近年来，长三角地区特别是上海通过地下水总量控制、人工回灌和监测预警体系建设，在地面沉降防治方面取得了显著成效。但在海平面上升、极端气候事件增多和地下空间持续开发背景下，传统的研究与防控思路效果有限。因此，有必要系统认识长三角地区地面沉降灾害机制。基于此，本文在梳理国内外研究成果的基础上，重点总结长三角地区地面沉降灾害的形成背景与主控因素，归纳其主要灾害特征与研究进展，并对未来研究方向进行展望，以期为区域地面沉降风险防控与安全治理提供参考。

1 长三角地区地面沉降发育概况

1.1 区域地质环境背景

长三角地区位于我国东部沿海，由上海市、江苏南部、浙江北部及周边区域共同构成，是我国经济最活跃、城镇化程度最高和工程建设最密集的区域之一。区域整体地势低平，河网湖荡密布，广泛发育第四系松散沉积层，具有典型的冲海积平原地貌特征，为地面沉降的发生提供了重要的地质基础。长三角地区软土普遍具有高含水量、高压缩性、高孔隙比和低强度等典型特征，部分区域还表现出明显的流变性和触变性。在地下水位变化、附加荷载增加和地下工程扰动等外部因素作用

下，更易发生长期缓慢固结和附加沉降，地面沉降过程表现出明显的层次性、滞后性和不均匀性。

因此，长三角地区兼具软弱土层广泛分布、地下水系统复杂、工程活动强烈扰动三重特征，是我国地面沉降最为典型和最具代表性的发育区之一。

1.2 地面沉降发育历程

长三角地区地面沉降具有明显的长期演化特征，其发生发展与区域地下水开发利用、城市化进程及重大工程建设密切相关。总体来看，区域地面沉降经历了由地下水超采主导向多因素耦合驱动转变的发展过程^[1]。

20世纪中期以来，随着工业化和城市化快速推进，长三角多个城市地下水开采强度不断增加，导致承压含水层水位持续下降，土层有效应力增大，地层压密作用显著增强，从而引发大范围地面沉降。其中，上海、苏州、无锡、常州、南通、嘉兴等地均曾出现较为明显的沉降漏斗或沉降中心，地面沉降一度成为制约城市发展的突出地质环境问题。上海是长三角地区地面沉降研究和防治最早、最系统的城市，自20世纪20年代发现沉降现象以来，经历了快速发展期、综合控制期和精细治理期，其演变过程在区域上具有较强代表性^[2,3]。

20世纪80年代以来，随着地下水限采、压采和人工回灌等措施逐步实施，区域内由地下水开采导致的快速沉降趋势得到一定遏制。然而，进入新世纪后，伴随高层建筑密集分布、轨道交通快速扩张、深基坑工程和地下空间开发活动大幅增加，地面沉降的驱动机制发生了显著变化。沉降不再主要表现为单一地下水超采引起的区域性压密，而更多体现为地下水动态调整、工程荷载增加及地下空间扰动共同作用下的复合变形过程，局部差异沉降和工程敏感区沉降问题日益突出。

1.3 地面沉降空间分布特征

长三角地区地面沉降在空间上表现出显著的不均匀性和区域差异性，整体呈现沿江沿海平原发育显著、核心城市及工程密集区更加突出的基本格局。区域内沉降主要集中于第四系

厚层沉积发育、地下水开发利用强度较大以及城市建设活动密集的平原地区，而基岩浅埋区和丘陵地区相对较弱。

从区域分布看，上海及其邻近地区是长三角地面沉降最典型、最连续的发育中心。由于软土层厚、城市荷载大、地下空间开发强度高，上海地面沉降不仅持续时间长，而且具有明显的中心城区向外围扩展、再由外围局部强化的发展特征。苏南地区如苏州、无锡、常州等地，受地下水开采历史、制造业集聚和快速城市建设影响，也形成了较为典型的沉降发育区。浙北平原和杭嘉湖地区由于地势低平、沉积厚度较大、河网密集，同样存在不同程度的沉降发育现象。总体而言，长三角地面沉降空间格局与区域软土分布、地下水系统特征和城市发展强度高度一致。

2 长三角地面沉降灾害机制研究现状与关键挑战

2.1 地面沉降灾害主控因素

在城市化过程中，随着地面荷载的增加，滨海区域可能出现潜在的沉降，严重威胁城市地质安全。目前最早记录到的地面沉降是在1891年墨西哥城^[4]。我国地面沉降灾害始于20世纪20年代的上海及天津市区^[5]。地面沉降作为一种缓变型和不可逆的环境地质灾害，会带来不可补偿的永久性环境和资源损失^[6]，严重影响区域内建设规划、经济、环境和社会的协调发展。

针对地面沉降这一地质灾害，已有许多学者进行了研究，发现基坑工程、地下水抽取、地表水体淘蚀、荷载及地下空间开发等是引发地面沉降的主要外部因素^[7]。刘飞等^[8]通过土层变形资料分析了地面沉降的原因，指出上海的第一、三软土层的变形会受基坑开挖和井点降水的影响；许焯霜等^[9]通过对上海市中心城区地面沉降量与工程建设进行相关性分析，发现中心城区的地面沉降量与工程建设具有相关性。目前的研究都已表明城市地面沉降与人类工程建设具有很强的相关性，地面沉降受工程建设开挖卸荷、高层建筑与密集建筑群长期荷载、地铁振动等影响相对较大^[10]。

地面沉降及地面不均匀沉降现象也会造成建筑物倾斜、地下管线破裂等灾害，对地铁等基础设施的运营安全具有长远影响。针对工程建设中土体和建筑物之间的动态反馈机制，目前大多研究集中于地震灾害下的土-结互馈机制研究中^[11]，但其动力学假设难以刻画地面沉降与人工扰动间长期非线性时变互馈过程。总得来说，现有研究中多局限于单一扰动因素下地面沉降灾害的关联分析，缺乏基于多源数据的系统性融合下的人类工程扰动与地面沉降灾害之间的动态反馈机制研究。

上海地区地面沉降影响由单纯地下水开采向浅层工程建设、中层地下水疏浚与深层回灌相结合转变^[12]，存在明显的人类工程扰动与沉降灾害互馈现象。人工地下水回灌对提高地下水位、控制地面沉降有一定作用，短时间内回灌井周围地面可

发生回弹，但对于增大深部土体回弹的效果不明显^[13]。同时地下水回灌对于城市地质安全也会带来一些负面作用，如日本曾因地下水位上升造成车站墙体开裂、抗浮桩失效等问题，因此不论是城市发展中的工程扰动还是地面沉降的防控活动，都会产生复杂影响。

2.2 关键挑战与科学问题

综上，长三角地区地面沉降灾害机制研究已取得一系列进展，但仍存在多方面的关键挑战，主要包括：

(1) 沉降主控机制识别不足

现有研究已表明，地下水开采与回灌、深基坑施工、轨道交通建设、高层建筑荷载及地下空间开发等均会对地面沉降产生显著影响，但多数研究仍侧重于单一因素分析，对于不同驱动因素在不同区域、不同层位及不同阶段中的主控作用缺乏统一认识。尤其是在长三角地区，地面沉降已逐步演变为地下水调控、工程扰动与区域城市化共同作用下的复合过程。如何定量识别多因素耦合作用下的主控机制及其动态转化规律，是当前亟待解决的重要科学问题。

(2) 长期缓变过程与短时突发效应之间的联系不清

地面沉降本质上属于长期累积的缓变型灾害，但其工程后果往往表现为局部突发性失稳，如隧道变形、管线破坏、地表塌陷和建筑物不均匀沉降等。现有研究多集中于沉降长期演化特征分析，或针对单一工程失稳现象开展局部研究，尚缺乏对地面沉降从缓慢变形累积到突发性工程灾害发生的跨尺度演化路径的研究。

(3) 区域尺度与工程尺度之间缺乏统一分析框架

目前区域尺度研究主要依赖InSAR、水准测量、GNSS及地下水监测等手段，用于识别沉降中心、沉降速率及其时空演化特征；工程尺度研究则更多聚焦于基坑、隧道、建筑基础等局部结构的变形响应与稳定性分析。两类研究在对象、尺度和方法上存在明显分割，尚未形成从区域沉降背景场到局部工程响应、再到基础设施功能退化的一体化分析框架。

3 未来研究方向展望

面向未来，在海平面上升、极端气候事件增多、地下空间持续开发及基础设施老化等多重背景下，长三角地区地面沉降灾害研究需重点在以下几个方面深化。

(1) 加强主控机制的定量识别

长三角地区地面沉降已由早期地下水开采主导的单因素过程，演化为地下水调控、工程荷载、深基坑开挖、轨道交通建设及区域城市化共同作用下的过程。未来研究应进一步加强不同驱动因素贡献的定量分解，明确其不同区域、不同层条件不同城市发展阶段中的主控作用及转化规律，建立面向长三角典型城市群的地面沉降主控机制识别方法。

(2) 揭示长期缓变累积与短时工程扰动耦合的演化机制

地面沉降虽属缓变型灾害,但其后果常表现为隧道变形、管线破坏、地表塌陷及建筑物不均匀沉降等局部突发问题。未来研究应从这一连续过程出发,重点揭示地面沉降从长期累积变形向突发性工程灾害转化的内在机理,识别关键控制环节、敏感响应指标及潜在失稳阈值,从而更准确地认识缓变型地质灾害向工程灾害演化的过程特征。

(3) 构建区域尺度与工程尺度相衔接的多尺度分析框架

当前地面沉降研究在区域监测与工程响应之间仍存在较明显脱节。未来应进一步加强区域尺度沉降背景场、工程尺度扰动场与结构响应场之间的耦合研究,实现由区域沉降识别向一体化风险预判的转变。

总体而言,未来长三角地区地面沉降研究应从单一因素识

别和现象描述,进一步走向多因素机制解析、多尺度过程贯通的新阶段,为长三角地区地面沉降灾害的精细化防控、基础设施安全保障及区域可持续发展提供更加坚实的理论支撑。

4 结论

长三角地区软土广布、地下水系统复杂,且城市化与地下空间开发强度大,是我国地面沉降最为典型和显著的发育区之一。其地面沉降具有长期累积性、空间不均匀性和区域差异性。其地面沉降已逐步演变为多因素共同作用下的多因素过程。地面沉降不仅表现为区域性地表变形,还会进一步影响工程结构安全并诱发次生问题。当前研究虽已取得一定进展,但在主控机制定量识别、长期缓变与短时扰动耦合机理,以及多尺度衔接等方面仍存在不足。未来应加强多因素机制解析、多尺度一体化分析及风险防控研究,以支撑长三角地区地面沉降灾害治理与城市安全发展。

参考文献:

- [1] 叶淑君,薛禹群,张云.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,2005,27(2):140 - 7.
- [2] 龚士良,李采,杨世伦.上海地面沉降与城市防汛安全[J].水文地质工程地质,2008,35(4):96 - 101.
- [3] 王初生,袁芬,陈宝.上海城市地下工程环境地质效应的几个关键问题[J].地质灾害与环境保护,2005,16(2):161 - 4.
- [4] 崔振东,唐益群.国内外地面沉降现状与研究[J].西北地震学报,2007,(03):275 - 8.
- [5] 王寒梅,唐益群,严学新.软土地区工程性地面沉降预测的非等时距 GM(1,1)模型[J].工程地质学报,2006,14(3):398 - 400.
- [6] 黄雨,李景琳,陈蔚.基于水-土完全耦合的地面沉降计算方法研究[J].土木工程学报,2011,44(S2):198 - 201.
- [7] 武佩锋,王楚鑫.基于三角模糊层次分析法的地面沉降影响因素量化分析[J].公路工程,2025,50(02):251 - 8.
- [8] 刘飞,慎乃齐,陈华英.上海市地面沉降的发展过程与危害[J].钻探工程,2001,(Z1):94 - 6.
- [9] 许焯霜,马磊,沈水龙.上海市城市化进程引起的地面沉降因素分析[J].岩土力学,2011,32(S1):578 - 82.
- [10] 郭兴杰,王寒梅,史玉金.近期长江口南槽河道滩槽冲刷及驱动因素分析[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(4):785 - 96.
- [11] NAJAR I A, AHMADI R, AMUDA A G. Advancing soil-structure interaction (SSI): A comprehensive review of current practices, challenges, and future directions[J]. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2025, 6(1): 5.
- [12] WANG L, ZHOU C, GONG H. Land subsidence prediction and analysis along typical high-speed railways in the Beijing - Tianjin - Hebei Plain area[J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4606.
- [13] 暴世康,叶淑君,严学新.上海地面沉降管控分区沉降特征及地下水采灌对比研究[J]. Shanghai Land & Resources, 2021, 42(2).