

人工智能技术在地面沉降研究中的应用与展望

秦同春, 俞同云, 王 勇, 宁 迪, 王海刚

Application prospect of AI technology in the land subsidence analysis

QIN Tongchun, YU Tongyun, WANG Yong, NING Di, and WANG Haigang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统

Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings

何健辉, 张进才, 陈勇, 闫星光, 施斌, 魏广庆, 贾立翔, 刘苏平 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 146–153

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162–171

基于InSAR技术的内蒙古巴彦淖尔市地面沉降演化特征及成因分析

An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR

葛伟丽, 李元杰, 张春明, 张红霞, 王志超, 杨红磊 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 198–206

地面沉降对含水层参数及给水能力的影响研究

A study of the influence of land subsidence on hydraulic parameters and water supply capacity

刘蓉, 曹国亮, 赵勇, 陆垂裕, 孙青言, 严聆嘉, 彭鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 47–47

地下水污染风险预警等级及阈值确定方法研究综述

Review on the determination methods for early warning grade and threshold of groundwater pollution risk

王嘉瑜, 蒲生彦, 胡, 李博文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 43–50

基于广播RTK边缘计算的北斗高精度地质灾害监测系统及应用分析

The Beidou high precision geological disaster monitoring system based on RTK edge calculation and its application analysis

朱真, 江思义, 刘小明, 李志宇 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 176–183



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404049

秦同春, 俞同云, 王勇, 等. 人工智能技术在地面沉降研究中的应用与展望 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 232-240.
QIN Tongchun, YU Tongyun, WANG Yong, et al. Application prospect of AI technology in the land subsidence analysis[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 232-240.

人工智能技术在地面沉降研究中的应用与展望

秦同春¹, 俞同云¹, 王 勇², 宁 迪³, 王海刚³

(1. 南通理工学院土木工程学院, 江苏 南通 226001; 2. 海南省海洋地质调查院, 海南 海口 570206;
3. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081)

摘要: 地面沉降作为全球性的环境地质问题, 对城市安全和可持续发展构成了严峻挑战。随着监测技术的进步, 传统的研究方法在大数据处理和监测预警工作中面临速度和准确性的挑战, 迫切需要新的技术手段以提高效率。人工智能(artificial intelligence, AI)技术作为新质生产力的代表, 在数据预处理、模型搭建、趋势预测等方面有着传统处理方法无法比拟的优势。文章对 AI 技术在地面沉降研究中的应用与展望进行综述, 旨在将 AI 技术进一步引入地面沉降研究。首先对 AI 技术进行背景介绍, 分析了其在地面沉降研究中的应用现状; 随后, 从监测预警系统以及宏观和微观机理研究的角度, 对 AI 技术在地面沉降研究中的应用前景进行论述, 分析了 AI 技术在提高研究效率和准确性方面的潜力; 最后针对 AI 技术在地面沉降研究应用中的局限性提出了工作建议。文章认为地面沉降研究需要 AI 技术进一步助力。将 AI 技术更深入地引入地面沉降研究, 不仅有助于提高地面沉降研究的数据处理能力, 还有可能为地面沉降的早期预警和有效防控提供新思路, 有助于推动地面沉降研究领域的进步和发展。

关键词: 新质生产力; 人工智能; 地面沉降; 数据处理; 监测预警系统

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0232-09

Application prospect of AI technology in the land subsidence analysis

QIN Tongchun¹, YU Tongyun¹, WANG Yong², NING Di³, WANG Haigang³

(1. Department of Civil Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong, Jiangsu 226001, China;
2. Hainan Marine Geological Survey, Haikou, Hainan 570206, China; 3. China Institute of Geo-Environment
Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China)

Abstract: As a global geo-environmental issue, land subsidence poses a severe challenge to urban safety and sustainable development. Traditional methods for land subsidence analysis face challenges in terms of speed and accuracy in big data processing and monitoring; it thus requires new approaches. Artificial intelligence (AI) technology, as a representative of new quality productive forces, offers advantages in data preprocessing, model construction, and trend forecasting. This paper aims to further integrate AI into the study of land subsidence through a literature review. Initially, the paper provided a background introduction to AI and analyzed its current application in the field of land subsidence. The application of AI in land subsidence from the perspectives of monitoring and early warning systems, as well as macroscopic and microscopic mechanism studies was then

收稿日期: 2024-04-22; 修订日期: 2024-05-22

投稿网址: www.swd zgcdz.com

第一作者: 秦同春(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水资源调查工作。E-mail: qintongchun@163.com

通讯作者: 王勇(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 281115212@qq.com

prospected, highlighting the potential of AI in improving efficiency and accuracy. Finally, this review analyzed the limitations of AI and proposed suggestions in the future. It states that the study on land subsidence requires further assistance from AI technology. A deeper integration of AI technology into land subsidence analysis will not only improve data processing capabilities but also provide new insights into the early warning and effective control of land subsidence, contributing to the advancement and development of the field of land subsidence.

Keywords: new quality productive forces; AI; land subsidence; data processing; monitoring and early warning systems

地面沉降是指由于地下工程施工、地下流体开采、矿山开采以及地质条件变化等因素引发的地表高程下降现象^[1]。随着城市化进程加快、人口增长、工程建设频繁,全球很多国家出现不同程度的地面沉降,导致了城市地下管线断裂、建筑物倾斜或塌陷、基础设施损坏等工程问题,以及海水入侵,地下水咸化和耕地盐渍化等环境地质问题^[1-2]。

对于人为因素诱发的地面沉降可以通过长期动态立体化监测进行防控。我国在地面沉降监测网络建设方面已取得显著进展,构建了多元化立体监测网络,实现了从传统散点式监测向空间化监测的升级^[3]。监测手段包括水准测量、分层标测量、基岩标测量、GPS 监测、InSAR 监测、光纤光栅监测和地下水位监测等,产生了海量的结构化与非结构化监测数据^[4-5]。

地面沉降研究中常采用的传统数据处理方法以统计学方法为主,包括描述性统计分析、推论性统计分析、线性和非线性回归分析等。但是面对监测大数据,传统方式已经无法满足需求。比如,在处理大数据前,由于数据杂乱且数量巨大,需要对形式复杂的原始数据进行归类 and 整理;在分析过程中,需要使用分布式平台和脚本语言对数据进行处理,同时需要选择合适的算法和模型,以保证结果精度;此外,数据分析需要从不同角度出发,既要考虑宏观战略层面的发展趋势,又要关注数据趋势极细微的变化。人工智能(artificial intelligence, AI)技术作为新质生产力的重要组成部分,在数据预处理、模型搭建和趋势预测方面比传统数据方法速度更快,准确率更高。

除了在数据处理中展现出优势,AI 技术在地质灾害监测预警系统也得到了应用,尤其是在滑坡、泥石流、地震等突发性地质灾害中,已经展现出快速响应和高精度分析的能力。这些系统能够实时监测地表细微变形、地下水位、土壤湿度等关键指标,并通过中央处理系统进行深入分析,识别和预测潜在的地质灾害模式和发展趋势。地面沉降是缓变性地质灾害,与突发性地质灾害相比,AI 技术的应用程度不

高。目前 AI 技术在地面沉降研究中的应用仅徘徊在数据分析处理阶段,人机交互的程度尚浅,尚未能实现全面智能监测预警。但是随着科学技术的进步,AI 技术的优势越来越凸显,未来地面沉降研究必定需要其更多的辅助。为更好地适应当前工作需求,更深入地应用 AI 技术开展地面沉降研究势在必行。

本文在收集国内外相关研究文献的基础上,综述了 AI 技术在地面沉降研究中的应用现状,对应用前景进行了展望,分析了 AI 技术可能存在的不足并提出了解决方案,旨在将 AI 技术进一步引入地面沉降研究,推动地面沉降研究领域的进步和发展。

1 AI 技术在地面沉降研究中的应用现状及进展

AI 一词最早诞生于 1956 年,由麦卡锡、明斯基等科学家首次提出^[6]。AI 以模仿人类智慧的机器为研究对象,旨在研发模拟甚至超越人类智慧的机器,研究领域涉及机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理等方向^[7]。自诞生以来,AI 技术已在医疗卫生、航空航天、特殊材料、自动驾驶、智能家居等领域取得突破性进展。近几年,在地面沉降研究中,AI 技术以其强大的数据处理能力,为分析处理复杂的地面沉降数据提供了新视角。

按照应用分类,AI 技术可以分为机器学习(machine learning, ML)、深度学习(deep learning, DL)、自然语言处理、计算机视觉、机器人技术。现阶段 AI 技术在地面沉降研究中的应用,主要依赖 ML 和 DL 的模型(或算法)。

AI、ML、DL 三者之间的关系可以理解为相互包含的关系,其中 ML 是 AI 的子集,DL 是 ML 的子集。如图 1 所示,ML 与 DL 的区别在于,DL 的智能化程度更高,通过模仿人脑神经网络系统自动从数据中提取有用的特征,自行完成数据处理和分析过程^[8-10]。

随着新算法持续被提出以及现有模型不断优化,精确地统计当前存在的模型数量比较困难^[11-13]。根

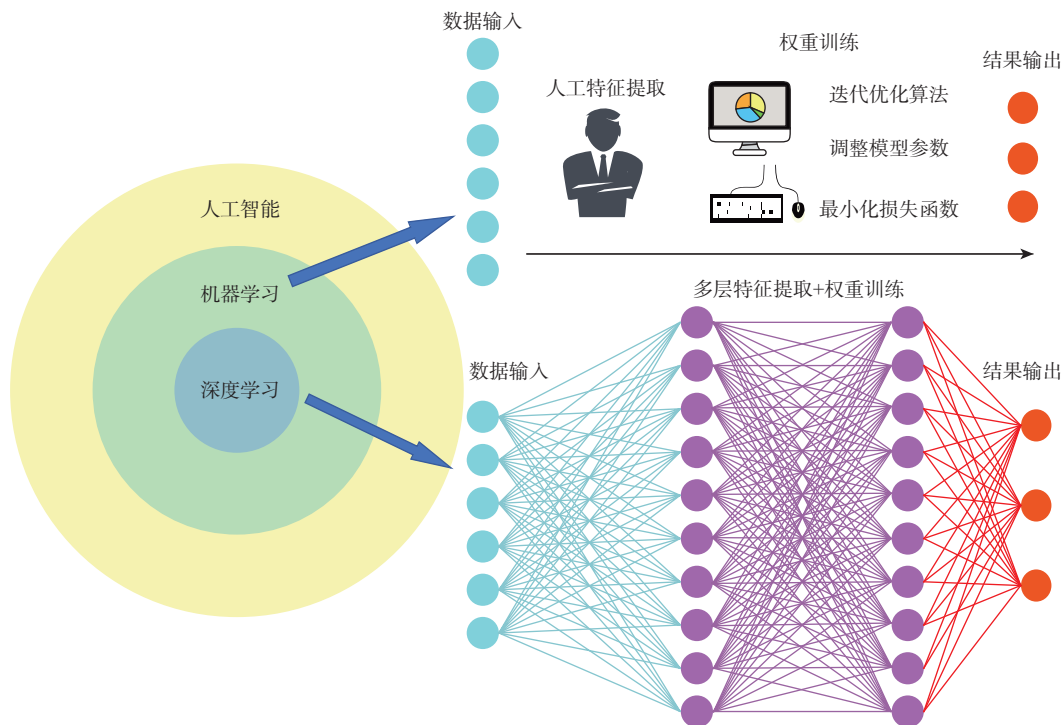


图 1 人工智能、机器学习以及深度学习之间的关系

Fig. 1 Relationship of AI, ML, and DL

据以往发表的研究^[14-15],在地面沉降领域,常用的 ML 模型有决策树、朴素贝叶斯、K 近邻(k-nearest neighbor, KNN)、支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林(random forest, RF)、反向传递(back propagation, BP)神经网络、主成分分析(principal component analysis, PCA)、Apriori 模型等;常用的 DL 模型有长短期记忆递归神经网络(long short term memory, LSTM)、卷积网络(convolutional neural network, CNN)、受限玻尔兹曼机等。各种模型都有各自优缺点,根据不同的应用场景选择合适的模型算法,是获得理想预期成果的关键。

随着 AI 技术发展,国内外已经有部分学者将 AI 技术应用于地面沉降研究中。但与其他学科相比,已发表成果数量相对较少。本文基于知网、WOS、Scopus 等主流文献综合数据库,较为全面地收集了 AI 技术应用于地面沉降研究的相关文献,但总量不多。国内外学者对于 AI 技术应用于地面沉降的研究主要是将传统的回归分析、灰色模型等数理统计方法进行升级,采用 ML 和 DL 方法对数据进行分析,研究地面沉降演化特点与影响因素的关系^[16]。

以 ML 模型为例,实际应用中,学者利用 ML 模型构建地面沉降量及其影响因素的特征联系,将地下水位变化量、含水层厚度、上部荷载等影响地面沉降的

因素作为自变量,将地面沉降量作为因变量,从数学角度分析数据间的内在联系^[17-20]。比如,Zhu 等^[21]利用 BP 模型模拟了北京密怀顺地区的地面沉降发展历史与北京潮白河冲洪积平原扇中上段地下水位变化、可压缩层厚度和建筑面积变化的空间关系,结果表明地下水位与地面沉降在小区域尺度上呈显著线性关系,但在大区域尺度上呈现非线性关系。Shi 等^[22]利用 PCA 模型模拟了北京地面沉降量与地下水位变化、可压缩层厚度之间的关系,研究结果表明地面沉降与影响因素之间存在非线性关系。

ML 模型可以很好地反映地面沉降量及其影响因素之间的数据关系,但是对于时序变化数据,DL 模型更为适合。为了捕捉更为复杂和抽象的数据特征,部分学者采用了 DL 模型进行地面沉降研究^[23-26]。比如,Li 等^[27]考虑到地面沉降的非线性和时间依赖性,采用了 LSTM 模型构建地面沉降量与可压缩层厚度、渗透系数间的关系,结果表明 LSTM 模型在沉降轻微的地区有较好适用性,在沉降严重区域的适用性较弱。

为了提高模型预测的准确性,也有学者将 ML 和 DL 模型组合使用或者多个对比使用,以构建最优方案^[28-30]。比如管浩等^[31]同时采用了 BP 模型、RF 模型、SVM 模型、KNN 模型对北京地铁施工导致的地

面沉降问题进行研究,研究结果表明 KNN 模型在处理数据样本不足的问题时表现出最佳预测效果。

综合上述研究现状,AI 技术在地面沉降研究中的应用有如下特点:

(1)处于相对起步阶段。相较于其他学科,AI 技术在地面沉降研究中的应用还处于起步阶段,应用案例和研究数量相对较少。

(2)没有实现真正智能化。目前在地面沉降中的应用还仅局限于利用 ML 模型和 DL 模型进行数据分析,然而 AI 技术在自然语言处理、计算机视觉、机器人技术等领域的优势尚未在地面沉降研究中得到充分利用。比如,如何利用 AI 技术实现地质报告自动化生成、地质结构可视化分析、机器人辅助现场监测等,都是可以探索的方向。

(3)不同的模型有不同的适应条件。目前的案例研究和模型比较研究表明,在应用 AI 技术开展地面沉降研究时,需要综合考虑地质背景、降水、人工活动等因素,根据不同的应用场景谨慎选择模型算法。

(4)在实现 AI 模型的过程中,计算机编程语言发挥着至关重要的作用。比如以 C++、Java、C#、Python 为代表的编程语言,为研究者们提供了强有力的支持。目前在地面沉降研究中,实现 AI 模型的首选编程语言是 Python。其语法简单明了,代码可读性强,拥有广泛的标准库和开源库,简化了应用 ML 模型和 DL 模型的编程过程。比如,利用 NumPy 和 Pandas 库,能实现对地面沉降监测数据的前期处理;利用 Sci-kit Learn 库,可以搭建和训练 ML 模型;利用 PyTorch 库可以实现搭建 DL 模型;利用 Matplotlib 库能直观地以图表形式展示地面沉降数据分析结果。

2 AI 技术在地面沉降研究应用中存在的问题

现阶段 AI 技术在地面沉降研究中的应用以数据处理为主,使地面沉降研究得到显著的进步,但是不可否认距离全面智能监测预警尚有距离,同时现阶段的 AI 技术也存在如下局限性:

(1)人机交互的深度与广度尚需提升。在地面沉降研究中,深入分析沉降过程的复杂性和不确定性至关重要,如何将地面沉降研究与防治领域长期积累的经验 and 知识充分整合到 AI 模型中,使得模型更加贴合实际、满足地面沉降防治需求,仍是亟待解决的问题。此外,尽管 AI 技术在数据处理和模式识别方面

展现出巨大潜力,但在实际应用中,需要掌握各类复杂模型以及编程语言,对于技术人员的操作习惯提出了一定挑战。

(2)数据获取及共享存在壁垒。AI 技术对于区域性地面沉降研究有传统技术无法比拟的优势。仅在某一国家内利用 AI 技术开展区域地面沉降研究,尚具备可行性,但是利用 AI 技术对于不同国家和地区开展跨国别和跨区域的地面沉降研究还存在一定难度。其中壁垒主要包括不同国家和地区的数据收集标准和共享政策不一致、数据隐私与安全性规定不一致、AI 技术的应用水平和研究方向上存在差异、各国监测水平存在差异等。

(3)模型可释性依然有待加强。当前 AI 技术在地面沉降中的应用是基于统计资料及监测数据,利用模型和算法,寻找出数据间的隐藏联系,从而建立数学模型进行数据预测的过程,对于地面沉降的物理机制缺乏可释性。尽管目前已经有专家开始将物理模型输出参数作为 AI 模型的输入变量,但这种耦合方式不是真正意义上的耦合,提高模型的模拟精度并增强模型的可解释性需要进一步探索^[16]。

(4)AI 技术在地面沉降研究中的应用有待挖掘与延拓。现阶段 AI 技术在地面沉降研究的应用主要以数据分析为主,但 AI 技术不应局限于数据分析,而应进一步延伸拓展至全面智能监测预警,包括智能分析评估、智能风险响应、智能决策支撑等。比如,通过典型地区,以点带面,借助基础地质条件和外部环境的类比,对空白地区、数据不全地区进行智能分析评估。再比如,利用 AI 技术对多种数据源进行处理,构建智能监测预警模型,开发多媒体、全方位、全流程的展示系统,实现对地面沉降风险的及时响应,并设计用户友好的界面,使得非专业用户也能理解和使用 AI 提供的决策支持信息。

3 AI 技术在地面沉降研究应用中的展望与建议

3.1 AI 技术应用于地面沉降智能监测预警系统

AI 的计算及响应速度远超传统技术,已经在滑坡、泥石流、地震等地质灾害监测预警中得到应用^[32-34]。如前所述,我国自主研发的地质灾害监测预警系统,依托高精度传感器和监测设备,实现了对地表细微变形、地下水位、土壤湿度等关键指标的连续监测。这些监测数据通过高效的传输网络实时汇集

至中央处理系统,利用 AI 技术对数据进行深入分析,以识别和预测潜在的地质灾害模式和趋势。该系统目前主要适用于滑坡和泥石流等突发地质灾害。

尽管 AI 技术在滑坡、泥石流、地震等突发性地质灾害监测预警系统中已得到有效应用,但地面沉降作为缓变性地质灾害,AI 技术在其监测预警系统的应用尚未普及。造成这一现象的原因是多方面的:首先,地面沉降的微小变化往往不易被察觉,导致其监测预警的重要性常被忽视;其次,精准监测地面沉降设备需达到毫米级精度,对于搭载 AI 技术的监测设备要求较高;最后,由于地面沉降的区域性特点,监测系统需要处理大量数据,对数据存储系统和中央处理系统提出了更高的要求。

然而随着技术的进步,我国已有研究团队开始探索 AI 技术在地面沉降监测中的应用。比如,河北沧州平原区的地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站,作为我国首个研究平原区地下水超采综合治理与地面沉降防治的国家级综合性野外站,已联合国内高校的研究团队,尝试将 AI 技术整合到京津冀及周

边地区的地表形变动态监测网和地下水监测网中。

借鉴突发性地质灾害智能监测预警系统的成功经验,将 AI 技术应用于地面沉降监测预警系统,尤其是针对关键基础设施和重大线性工程,将极大地提升对缓变性地质灾害的响应能力,有效保障人民生命及财产安全。

3.2 AI 技术与地质模型耦合增强地面沉降预测模型的可释性

地面沉降的发生和发展具有一定地域性和时间性。在地域上,不同地区可能有不同的沉降规律。比如,在沿海地区由于存在巨厚层滨海相交互成层的砂土-黏土层,地下水开采会导致弱透水层非弹性释水,造成的地面沉降往往比内陆地区更为严重,甚至在控制抽水后依然存在长达几十年的沉降滞后现象^[35-40]。在时间上,地面沉降的规律与降水量、地下水水位等因素的变化息息相关。比如,短期季节性水位升降造成的土层变形是可逆的;长期抽水使地下水位降低,会造成弱透水层上的有效应力超过前期固结应力阈值,导致弱透水层压实,造成不可逆沉降^[41](图 2)。

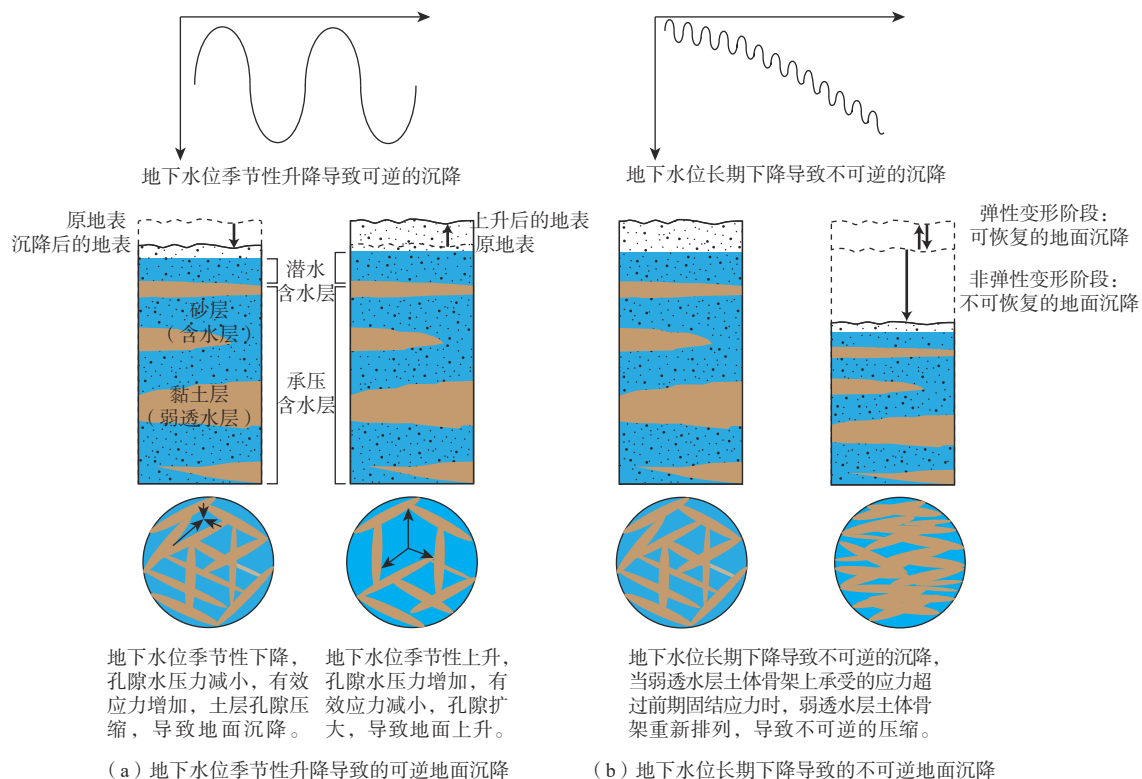


图 2 地下水水位变化与地面沉降的关系

Fig. 2 Relationship between groundwater level and land subsidence

传统的地面沉降趋势和规律分析模型需要较为全面的水文地质数据和实测数据,同时需要基于复杂

的本构关系建立流-固耦合模型,虽然可以模拟实际土层变形的物理机制,但控制方程复杂、计算量大、所

需参数多,在大范围实际应用中难以收敛^[42]。在大量长时间监测数据的基础上,利用 ML 模型和 DL 模型建立地面沉降预测模型,可以从数学角度建立地面沉降预测模型并推演发展趋势。

尽管 AI 技术的模拟效果较好,但是有部分学者担心 AI 技术对于地质现象的物理解释性不足。针对此类疑虑,目前已有国内外学者在地学领域中尝试将地质模型与 ML 模型进行耦合,比如将具有物理意义的参数作为 ML 模型和 DL 模型的输入参数来实现模型耦合^[16]。曹鑫宇等^[43]将北京平原区东部不同含水层的地下水水位作为输入参数,利用基于注意力机制的长短时记忆网络(attention mechanism long short term memory, AM-LSTM)建立了水位变化和沉降量的关系模型。尽管此类研究尚处于起步阶段,但随着 AI 技术与地面沉降研究更加深度的融合,可以预见 AI 技术与地质模型耦合,可以有效解决两者短板,将地面沉降研究推入新的高度。

3.3 AI 技术研究地面沉降微观机理

目前尚未查询到有学者利用 AI 技术对地面沉降微观机理开展相关研究,但是随着扫描电子显微镜、计算机断层扫描、核磁共振等设备和技术的发展,已经有学者应用 AI 技术与图像识别技术研究岩土体微观结构^[44]。

现代微观结构研究表明,土体的宏观工程力学性质受微观结构状态和变化规律的影响,土体不连续性、非均质性、各向异性等复杂物理力学性质是微观结构特性的宏观具象体现。从宏观角度看,超采地下水诱发了地面沉降,从微观角度看,地面沉降的本质是土体失水,导致土颗粒内部微观结构发生固结变化^[45]。尽管此类研究尚未开展,但从技术可行性来看,AI 技术与图像识别技术联合应用于地面沉降微观机理研究是可行的。

3.4 参考建议

地面沉降成因多样,沉降发展过程复杂。尽管本文已经尝试剖析 AI 技术在地面沉降研究实际应用中可能遇到的瓶颈,并对可能的 AI 应用场景进行分析,但限于当前认知或存纰漏。笔者相信随着认知加深和技术进步,AI 技术在地面沉降研究中的应用肯定会越走越远,实现从大数据处理到全方位智能监测预警的跨越。

针对当前的 AI 技术在地面沉降研究中的应用现状及瓶颈,笔者谨慎地提出以下几点建议,以期为该领域的未来发展提供一些参考和启示:

(1)加强政策支持。各级政府和科研机构应提供政策和资金支持,鼓励 AI 技术在地面沉降研究中的应用,促进技术的研发和推广。

(2)促进跨学科合作。加强不同学科之间的合作,整合环境地质、水文地质、工程地质、城市地质、遥感与测绘、地理信息系统、地球物理勘探、AI 技术等领域的研究力量,形成协同创新的研究模式。

(3)开展技术研发与示范应用。重点支持 AI 技术在地面沉降监测、预警、决策支持系统中的研发,并在具有代表性的地区进行试点,验证 AI 技术的有效性。

(4)加快人才培养,推动知识普及。高校加强培养具有 AI 技术背景的地质类专业人才,并通过研讨会、培训班等形式培训技术人员掌握 AI 技术。

(5)加强国际合作与数据共享。加强与国际研究机构的合作,共享数据资源,共同推动 AI 技术在地面沉降研究中的应用和发展。

(6)构建知识库和专家系统。建立地面沉降领域的知识库和专家系统,集成长期积累的专业知识和经验,对 AI 技术的应用进行专业性把握,提高科学性和决策质量。

(7)加强模型可解释性研究。加强 AI 模型的可解释性研究,确保模型的决策过程透明,增强用户对 AI 技术的信任和接受度。

4 结语

AI 技术的发展和运用是新质生产力的体现,也正在引领一场科技革命和产业变革。在地面沉降研究领域,AI 技术的应用前景充满希望与挑战。AI 技术在处理和分析大量地面沉降监测数据方面有传统处理方式无法比拟的优势,此外 AI 技术在实时监测和预警系统的构建方面也显示出巨大的潜力,有望实现对地面沉降事件的快速响应,降低灾害风险。

参考文献 (References):

- [1] 秦同春,程国明,王海刚.国际地面沉降研究进展的启示[J].地质通报,2018,37(增刊1):503-509. [QIN Tongchun, CHENG Guoming, WANG Haigang. Enlightenment from the progress of international land subsidence research[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(Sup 1): 503-509. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张阿根,刘毅,龚士良.国际地面沉降研究综述[J].上海地质,2000,21(4):1-7. [ZHANG Agen, LIU

- Yi, GONG Shiliang. Overview of international land subsidence research[J]. Shanghai Geology, 2000, 21(4): 1 – 7. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 袁铭, 白俊武, 秦永宽. 国内外地面沉降研究综述 [J]. 苏州科技学院学报(自然科学版), 2016, 33(1): 1 – 5. [YUAN Ming, BAI Junwu, QIN Yongkuan. A review on land subsidence research[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 33(1): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 周永章, 王俊, 左仁广, 等. 地质领域机器学习、深度学习及实现语言 [J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3173 – 3178. [ZHOU Yongzhang, WANG Jun, ZUO Renguang, et al. Machine learning, deep learning and Python language in field of geology[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(11): 3173 – 3178. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 周永章, 陈烁, 张旗, 等. 大数据与数学地球科学研究进展——大数据与数学地球科学专题代序 [J]. 岩石学报, 2018, 34(2): 255 – 263. [ZHOU Yongzhang, CHEN Shuo, ZHANG Qi, et al. Advances and prospects of big data and mathematical geoscience[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(2): 255 – 263. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 阮晓钢. 人工智能专题序言 [J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(1): 3. [RUAN Xiaogang. Preface of artificial intelligence[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(1): 3. (in Chinese)]
- [7] 鲍磊, 杨静, 赵文渲. 人工智能机器人 ChatGPT 引发的问题及其对策研究 [J]. 河北软件职业技术学院学报, 2023, 25(3): 76 – 80. [BAO Lei, YANG Jing, ZHAO Wenxuan. Research on the problems caused by the artificial intelligence robot ChatGPT and its countermeasures[J]. Journal of Hebei Software Institute, 2023, 25(3): 76 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [8] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. *Neural Computation*, 2006, 18(7): 1527 – 1554.
- [9] BIANCO S, BUZZELLI M, MAZZINI D, et al. Deep learning for logo recognition[J]. *Neurocomputing*, 2017, 245: 23 – 30.
- [10] 王琛, 何有泉, 宋凌寒, 等. 理论辅助的弹塑性本构关系小样本深度学习 [J]. 工程力学, 2023, 40(9): 29 – 36. [WANG Chen, HE Youquan, SONG Linghan, et al. A theory-aided few-shot deep learning algorithm for elastoplastic constitutive relationships[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(9): 29 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李琪林, 严平, 陈白杨, 等. 一种模糊多粒度用电行为异常检测方法 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40(11): 3348 – 3352. [LI Qilin, YAN Ping, CHEN Baiyang, et al. Fuzzy multi-granularity-based abnormal power consumption detection method[J]. Application Research of Computers, 2023, 40(11): 3348 – 3352. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张驰, 潘懋, 胡水清, 等. 融合储层纵向信息的机器学习岩性识别方法 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 289 – 299. [ZHANG Chi, PAN Mao, HU Shuiqing, et al. A machine learning lithologic identification method combined with vertical reservoir information[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 289 – 299. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张雪峰, 王照乙. 基于双决斗深度 Q 网络的自动换道决策模型 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(10): 1369 – 1376. [ZHANG Xuefeng, WANG Zhaoyi. Automatic lane change decision model based on dueling double deep Q-network[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2023, 44(10): 1369 – 1376. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 路德春, 徐冰, 孔凡超, 等. 基于机器学习的盾构隧道地表沉降曲线智能预测方法 [J]. 北京工业大学学报, 2024, 50(11): 1285 – 1300. [LU Dechun, XU Bing, KONG Fanchao, et al. Intelligent prediction method for settlement curves of shield tunnel based on machine learning algorithms[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50(11): 1285 – 1300. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 徐浩, 廖铭新, 吕家树, 等. 基于机器学习的工作井开挖周边管线沉降预测研究 [J]. 广东土木与建筑, 2024, 31(6): 1 – 5. [XU Hao, LIAO Mingxin, LV Jiashu, et al. Prediction of Surrounding Settlement Due to Working Shaft Excavation Based on Machine Learning[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2024, 31(6): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 朱琳, 官辉力, 李小娟, 等. 区域地面沉降研究进展与展望 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 167 – 177. [ZHU Lin, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Research progress and prospect of land subsidence[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 167 – 177. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李丽. 地面沉降预测模型及其应用研究 [D]. 西安:

- 长安大学, 2014. [LI Li. Study on land subsidence prediction model and its application[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王显鹏, 黄声享. GM-BP 组合预测模型在基坑沉降分析中的应用 [J]. 测绘工程, 2016, 25(3): 61 – 63. [WANG Xianpeng, HUANG Shengxiang. Application of GM-BP combined model to deformation forecasting of foundation pit[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(3): 61 – 63. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 陈晨, 靳成才, 赵富章, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的基坑周边地面沉降预测方法研究 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(12): 47 – 52. [CHEN Chen, JIN Chengcai, ZHAO Fuzhang, et al. Study on the prediction methods of ground settlement surrounding the foundation pit based on PSO-BP neural network[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(12): 47 – 52. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 卢浩, 孙善政, 施烨辉, 等. 基于 Apriori 算法对地面沉降影响因素的数据挖掘及分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(增刊 2): 104 – 110. [LU Hao, SUN Shanzheng, SHI Yehui, et al. Data mining and analysis of influence factors for ground settlement based on apriori algorithm[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(Sup 2): 104 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ZHU Lin, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Comprehensive analysis and artificial intelligent simulation of land subsidence of Beijing, China[J]. Chinese Geographical Science, 2013, 23(2): 237 – 248.
- [22] SHI Liyuan, GONG Huili, CHEN Beibei, et al. Land subsidence prediction induced by multiple factors using machine learning method[J]. Remote Sensing, 2020, 12(24): 4044.
- [23] EL KAMALI M, ABUEL GASIM A, PAPOUTSIS I, et al. A reasoned bibliography on SAR interferometry applications and outlook on big interferometric data processing[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 19: 100358.
- [24] LI Huijun, ZHU Lin, DAI Zhenxue, et al. Spatiotemporal modeling of land subsidence using a geographically weighted deep learning method based on PS-InSAR[J]. Science of the Total Environment, 2021, 799: 149244.
- [25] LI Huijun, ZHU Lin, GUO Gaoxuan, et al. Land subsidence due to groundwater pumping: Hazard probability assessment through the combination of Bayesian model and fuzzy set theory[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2021, 21(2): 823 – 835.
- [26] YUN K, ADAMS K, REAGER J, et al. Remote estimation of geologic composition using interferometric synthetic-aperture radar in California's Central Valley [J]. ArXiv abs, 2212.04813 (2022).
- [27] LI Huiju, ZHU Lin, GONG Huili, et al. Land subsidence modelling using a long short-term memory algorithm based on time-series datasets[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2020, 382: 505 – 510.
- [28] RADMAN A, AKHOONDZADEH M, HOSSEINY B. Integrating InSAR and deep-learning for modeling and predicting subsidence over the adjacent area of Lake Urmia, Iran[J]. GIScience & Remote Sensing, 2021, 58(8): 1413 – 1433.
- [29] 李洛宾, 龚晓南, 甘晓露, 等. 基于循环神经网络的盾构隧道引发地面最大沉降预测 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 13 – 19. [LI Luobin, GONG Xiaonan, GAN Xiaolu, et al. Prediction of maximum ground settlement induced by shield tunneling based on recurrent neural network[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup 1): 13 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [30] JHONATAN S R R, HECTOR A A, JULIANA A P, et al. Forecasting deformation triggered by groundwater extraction using ps-insar time series. applying machine learning and statistical models in the madrid aquifer (spain) [C/OL]. USA: EGU General Assembly Conference Abstracts, 2023 [2024-01-18]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023EGUGA.2515915R>.
- [31] 管浩, 刘维, 王峰, 等. 基于数据增强和机器学习算法的盾构隧道引发地面沉降预测及应用 [J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊 1): 331 – 341. [GUAN Hao, LIU Wei, WANG Feng, et al. Prediction of surface settlement caused by shield tunneling based on data enhancement and machine learning algorithm [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(Sup 1): 331 – 341. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 张茂省, 贾俊, 王毅, 等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设 [J]. 西北地质, 2019, 52(2): 103 – 116. [ZHANG Maosheng, JIA Jun, WANG Yi, et al. Construction of geological disaster prevention and control system based on AI[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 103 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 李俊, 刘文方, 亓星, 等. 基于人工智能地质灾害监测

- 预测预警设备及其使用方法: CN114724340A[P]. 2022-07-08. [LI Jun, LIU Wenfang, QI Xing, et al. Artificial intelligence based geological hazard monitoring, prediction and early warning equipment and its usage method: CN114724340A[P]. 2022-07-08. (in Chinese)]
- [34] 于宪煜, 汤礼. 基于 SMOTE-Tomek 和 CNN 耦合的滑坡易发性评价模型及其应用——以三峡库区秭归—巴东段为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 141 – 151. [YU Xianyu, TANG Li. Landslide susceptibility mapping model based on a coupled model of SMOTE-tomek and CNN and its application: A case study in the Zigui-Badong section of the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 141 – 151. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 施小清, 薛禹群, 吴吉春, 等. 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, 2006, 33(3): 1 – 6. [SHI Xiaoqing, XUE Yuqun, WU Jichun, et al. A study of soil deformation properties of the groundwater system in the Changzhou area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3): 1 – 6. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 薛禹群, 吴吉春, 张云, 等. 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), 2008, 38(4): 477 – 492. [XUE Yuqun, WU Jichun, ZHANG Yun, et al. Simulation study on regional land subsidence in the Yangtze River Delta (south)[J]. Science in China (Series D (Earth Sciences)), 2008, 38(4): 477 – 492. (in Chinese)]
- [37] 张云, 薛禹群, 吴吉春, 等. 上海砂土蠕变变形特征的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1226 – 1230. [ZHANG Yun, XUE Yuqun, WU Jichun, et al. Experimental research on creep of Shanghai sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1226 – 1230. (in Chinese with English abstract)]
- [38] WANG Fei, MIAO Linchang, LV Weihua. Experimental study on the creep behavior of the Yangtze River sand[C]//GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design. Orlando: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [39] 孙晓涵, 崔向美. 高应力下西安含水层砂土蠕变特性的试验研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1133 – 1137. [SUN Xiaohan, CUI Xiangmei. Experimental research on creep characteristics of aquifer sand sediments in Xi'an under high stress[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1133 – 1137. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 等. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究 [J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1115 – 1127. [GUO Haipeng, BAI Jinbin, ZHANG Youquan, et al. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1115 – 1127. (in Chinese with English abstract)]
- [41] GALLOWAY D, JONES D R, INGBRISTEN S E. Land subsidence in the UNITED STATES [M/OL]. USA: U. S. Geological Survey, 1999[2024-01-18]. https://pubs.usgs.gov/circ/circ1182/pdf/04part1_intro.pdf.
- [42] 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)]
- [43] 曹鑫宇, 朱琳, 宫辉力, 等. AM-LSTM 网络的北京平原东部地面沉降模拟 [J]. 遥感学报, 2022, 26(7): 1302 – 1314. [CAO Xinyu, ZHU Lin, GONG Huili, et al. Land subsidence simulation in the east of Beijing plain based on the AM-LSTM Network[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(7): 1302 – 1314. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 李康. 地面沉降微观机理及流固耦合模型初探——以山东德州为例 [D]. 济南: 山东大学, 2019. [LI Kang. Preliminary research on micromechanism and fluid-solid coupling model of land subsidence: Taking Dezhou in Shandong Province as an example [D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 周萃英. 土体微观结构研究与土力学的发展方向——若干进展与思考 [J]. 地球科学, 2000, 25(2): 215 – 220. [ZHOU Cuiying. Research into soil mass microstructure and some progresses on soil mechanics[J]. Earth Science, 2000, 25(2): 215 – 220. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 宗 爽