

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.008

基于 InSAR 数据源的珠江三角洲平原区 地面沉降风险评价与区划

薛紫萱¹, 曾 敏^{2*}, 赵信文², 张 傲², 黎义勇², 何 军²,
王世昌², 江 拓², 孙慧敏³, 皮鹏程⁴

XUE Zi-Xuan¹, ZENG Min^{2*}, ZHAO Xin-Wen², ZHANG Ao², LI Yi-Yong², HE Jun²,
WANG Shi-Chang², JIANG Tuo², SUN Hui-Min³, PI Peng-Cheng⁴

1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205; 3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610213;
4. 中国葛洲坝集团第一工程有限公司, 湖北 宜昌 443002
1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;
2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China, Wuhan 430205, Hubei, China;
3. Institute of Mountain Hazards and Environmental, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, Sichuan, China;
4. China Gezhouba Group NO.1 Engineering Co., LTD, Yichang 443002, Hubei, China

摘要: 风险评价与区划是实现地面沉降地质灾害科学管控与精准防治的重要前提。本文基于 2016 年 8 月至 2019 年 6 月 SBAS-InSAR 技术获取的珠江三角洲平原区高精度地表形变数据, 结合层次分析法(AHP)与模糊综合评价法, 从危险性(软土厚度、地层岩性等)和易损性(人口密度、经济要素等)两个维度建立指标体系, 划分风险等级矩阵开展风险评价。结果显示: 全区地面沉降高危险区 110.84 km², 集中分布于珠海白蕉镇、中山坦洲镇等地; 高易损区 853.60 km², 集中于广州天河区、深圳宝安区等城市核心区; 高风险区主要分布在顺德容桂街道、珠海白蕉镇等地。重点防治区需强化地下水管控与监测网络建设, 一般防治区注重风险指标调控与公众意识提升。本文验证了 InSAR 数据与多因素评价模型在区域地质灾害风险评价中的适用性, 为珠江三角洲平原区防灾减灾及空间规划建设提供了科学依据。

关键词: 地面沉降; SBAS-InSAR; AHP-模糊综合评价法; 风险评价; 珠江三角洲平原区

中图分类号: P237; P642.26

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0328-11

Xue Z X, Zeng M, Zhao X W, Zhang A, Li Y Y, He J, Wang S C, Jiang T, Sun H M and Pi P C.
2025. Risk Assessment and Zoning of Land Subsidence in Pearl River Delta Plain Based on
InSAR Data Sources. *South China Geology*, 41(2): 328–338.

Abstract: Land subsidence is a significant geohazard that requires scientific control and precise prevention. The research uses high-precision surface deformation data from the Pearl River Delta plain acquired by SBAS-InSAR technology from August 2016 to June 2019. It combines the AHP hierarchical analysis method and the fuzzy comprehensive evaluation method to establish an index system based on two dimensions:

收稿日期: 2025-03-06; 修回日期: 2025-04-25

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221729); 珠海市政府项目(MZCD-2201-008)

第一作者: 薛紫萱(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事 InSAR 地表形变和环境监测研究, E-mail: xuezx@cug.edu.cn

通讯作者: 曾敏(1982—), 男, 正高级工程师, 主要从事水工环境地质与城市地质调查方面的研究, E-mail: zengmin1982@sina.com

danger (e.g., soft soil thickness and stratum lithology) and susceptibility (e.g., population density and economic factors). The research classifies the risk level matrix to evaluate the risk. Substantial land subsidence poses a critical concern across the study region, with spatial patterns revealing distinct vulnerability zones. Notably, high-risk subsidence areas (110.84 km²) are concentrated in Baijiao Town (Zhuhai) and Tanzhou Town (Zhongshan), while high-vulnerability zones encompass 853.60 km² spanning Guangzhou's Tianhe District, Shenzhen's Bao'an District, and other urban cores. Furthermore, high-susceptibility zones are predominantly located in Ronggui Street (Shunde) and Baijiao Town (Zhuhai), underscoring the need for targeted mitigation strategies in these geographically clustered risk hotspots. The key prevention and control areas must strengthen groundwater control and monitoring network construction, while general prevention and control areas must focus on risk indicator regulation and public awareness promotion. The research verifies the applicability of InSAR data and the multi-factor evaluation model in regional geohazard risk evaluation and provides a scientific basis for disaster prevention, mitigation, and spatial planning in the Pearl River Delta plain area.

Key words: land subsidence; SBAS-InSAR; AHP-Fuzzy comprehensive evaluation method; risk evaluation; Pearl River Delta plain

地面沉降现象在 19 世纪末至 20 世纪初就被人们发现(1891 年,墨西哥城;1898 年,日本新潟),但因为沉降幅度小,危害不明显。直到 20 世纪 30 年代,随着相关研究的开展,地面沉降现象才逐渐引起人们的广泛关注。地面沉降的幅度和范围也逐年扩大,如至 1958 年日本新潟地面沉降速率已达 530 mm/a(Miura et al., 1988)、意大利 Ravenna 地区大面积的地面沉降速率已由 20 世纪的每年数毫米增至二战后的 110 mm/a (Gambolati et al., 1999; Teatini et al., 2005);我国地面沉降主要分布区也由 20 世纪初期的上海及天津市区扩大至 90 年代的长江三角洲和黄淮海平原区(薛禹群等, 2003; 殷跃平等, 2005)。据统计,目前世界上已有 150 多个国家和地区发生过地面沉降(Barends et al., 1995)。

目前在地面沉降监测和风险评估领域仍然面临诸多挑战。首先,现有监测手段在空间覆盖和时间范围上存在局限性。传统的监测技术如 GPS、水准测量等难以开展大范围、高精度和高空间分辨率的地表沉降监测工作(王会强等, 2016)。一直以来,国内外对城市区域性地面沉降的关注度很高,在地面沉降调查与监测、地面沉降特征及分区、地面沉降发展趋势预测、地面沉降影响因素及控制机理研究、地面沉降缓解与治理措施、

地面沉降对社会经济影响及法规制订等方面开展了广泛研究(高峰等, 2023)。天津、江苏沿海地区(连云港、盐城、南通)、南京、沧州、北京和阜阳等地,结合各自地质环境与经济发展特点,建立反映当地地面沉降特征的风险评价体系并进行区划分析,目的是减少地面沉降给社会、经济带来的损失(于海若等, 2020)。但是,现有研究大多集中于较为单一因素的分析,未能有效整合多源信息形成全面的风险评估标准,且针对珠江三角洲平原区的复杂城市体系,尚缺乏综合、系统的地面沉降风险评价体系,导致在防灾减灾策略上难以精准对准高风险区域。

为应对上述挑战,合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)成为一种可行的高效监测手段。相比其他遥感技术手段,InSAR 技术有不受天气和光照的影响且穿透力强、精度高等优势(闫斌等, 2023)。其中短基线集成孔径雷达干涉测量(Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar, SBAS-InSAR)技术作为一种时间序列 InSAR 方法,能够有效抑制相干性衰减和大气误差的干扰,适用于对大范围、低速形变目标进行长期连续监测(Berardino et al., 2002),在地面沉降监测中被广

泛应用。美国弗吉尼亚理工大学研究人员结合高分辨率的垂直地面运动数据(即陆地的上升或下降)和海平面上升预测数据,量化了 32 个美国主要沿海城市可能受到淹没影响的区域(Ohenhen et al., 2024)。Ao Z R et al.(2024)主要使用卫星干涉合成孔径雷达(InSAR)产生的数据分析了中国 82 个主要城市(大于 200 万人口,省会或者重要工业城市)的地面沉降状态、影响人口、关联因素,并预测后续影响。在地面沉降风险评价方面,研究表明 InSAR 技术在监测区域沉降方面具有可靠性与准确性(赵团芝等, 2016)。常用的地质灾害危险性评价定量分析方法主要有层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)、模糊综合评判法、逻辑回归法、确定系数法和信息量法等。学者们(庞栋栋等, 2021; 刘晓, 2022; 王颖等, 2022)对甘肃、吉林辽源、北京等地采用以层次分析法为主的定量分析来确定评价因子权重,通过空间分析来开展危险性及易损性分析,最终得到风险区划结果。本文通过构建层次结构模型,将复杂问题分解为更小的评估单元,帮助决策者从多维角度进行分析和量化评价。

粤港澳大湾区作为中国开放程度高、经济活力强的区域,同时也是世界上人与自然相互作用最强烈的典型区域之一。但是由于其沉积性质以及大规模的城市化,地面沉降正逐渐对大湾区造成威胁(林超奇等, 2023; 曾敏等, 2023)。深厚欠固结软弱土及其诱发的地面沉降已成为湾区内代表性的区域地质灾害问题,影响城市地质环境安全(戴真印等, 2023)。珠江三角洲软土大量分布,尤其作为典型填海造陆区的新成陆地,由于未经过充分自然压实和固结,加剧了沿海平原的软基沉降灾害(姜守俊, 2013),已造成受灾区总面积高达 60 km²,直接经济损失超 5 亿元(余革森等, 2017),成为影响珠江口三角洲地区经济可持续发展的突出环境问题之一(谢先明等, 2021)。研究表明,软土层的固结沉降主要由自然沉积与人类活动共同驱动。例如,填海造地、地下空间开发及高等级公路建设加速了软土的排水固结过程,导致沉降速率显著增加(高磊等, 2020)。因此,开展针对地面沉降地质灾害的全面调查、科学评估与

有效防控,对于粤港澳大湾区的高质量发展具有至关重要的意义。

本文通过 SBAS-InSAR 技术获取 2016 年 8 月至 2019 年 6 月珠江三角洲平原区高精度的地表形变数据,应用灾害风险评价理论和方法,采用 AHP-模糊综合评价法确定评价因子权重建立指标体系,对全区地面沉降的危险性、易损性和风险区划进行综合评价,为区域防灾减灾、规划建设提供科学依据。

1 研究区概况

研究区地处广义的珠江三角洲地区,位于西太平洋构造域与欧亚板块东南部大陆边缘的交汇带。自中生代以来,受古太平洋板块俯冲、弧后裂谷作用及南海海底扩张的影响,区域内经历了广泛的挤压-伸展交替过程,形成了复杂的地质构造格局(刘颖琛, 2021)。

珠江三角洲平原为松散沉积物堆积平原,以海相沉积的淤泥、淤泥质土为主,软土分布面积达 11 187 km²(图 1),分布厚度在 5~40 m 之间(黄建龙等, 2019),为地面沉降的发展奠定了物质基础。区内软土分布范围受地理条件和基底岩石埋深控制,主要位于三角洲平原、河流冲积平原和沿海海积平原区,其以海相沉积的淤泥、淤泥质土为主,其次为泥炭土、淤泥质砂、含炭化植物碎屑和贝壳碎片等。软土越靠近丘陵台地其厚度越小,越靠近河流、海滨,其厚度越大,软土厚度以 [10, 20) m 为主, [20, 30) m 次之,再次是 [30, 40) m,厚度大于 40 m 软土分布范围最小,最厚为 47.20 m(珠海金湾高尔夫球场)。其中软土厚度超过 10 m 的区域主要集中在珠江三角洲沿海出海口地带及江门至中山、佛山的部分区域,面积达 2 792.85 km²。厚度超过 30 m 的区域面积为 364.23 km²,主要位于珠海斗门白蕉镇、金湾高尔夫球场、鸡啼门水道两侧、中山坦洲、中山民众、万顷沙及江门新会大鳌镇等地(图 2a, 谢先明等, 2021)。在垂直方向上,区内软土厚度变化总体由前期构造运动形成的基底控制,大致可分三层,以第一软土层为最厚,第二软土层次之,第三软土层最薄。总趋势是

往南东方向软土厚度逐步增大。此外,珠江三角洲地区的地面沉降现象自发现至今已持续近四十年,部分区域累计沉降量超过 300 mm,整体呈缓慢发展趋势。本次 InSAR 时间序列分析结果亦

显示,多数监测点沉降量持续增长,沉降漏斗的空间范围亦呈现出逐步扩展态势进一步验证了地面沉降具有长期性、持续性发展的特点。

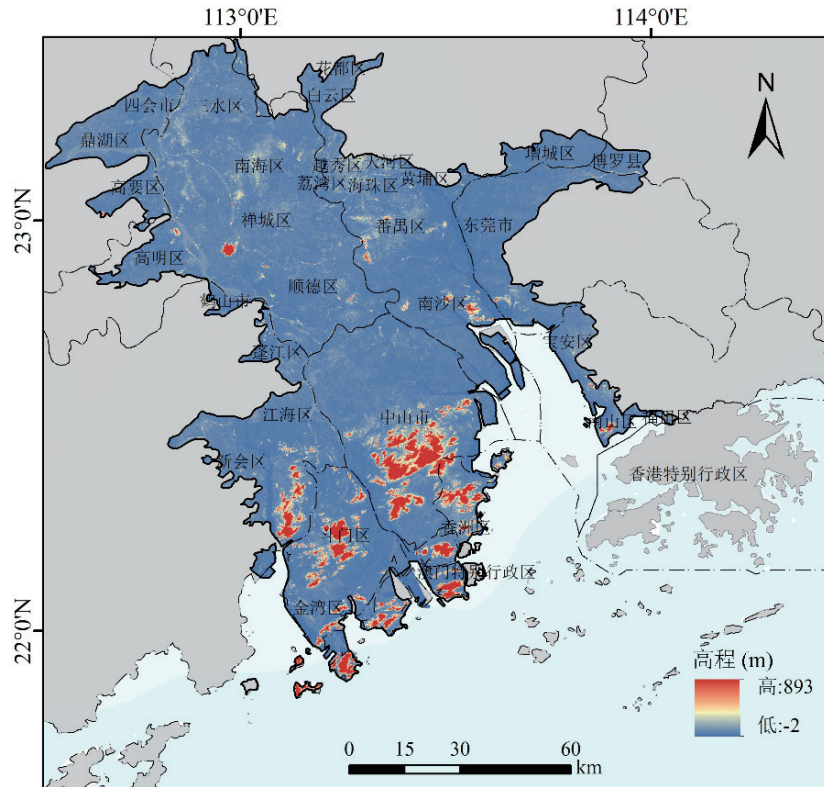


图 1 研究区区位图

Fig. 1 Location map of the study area

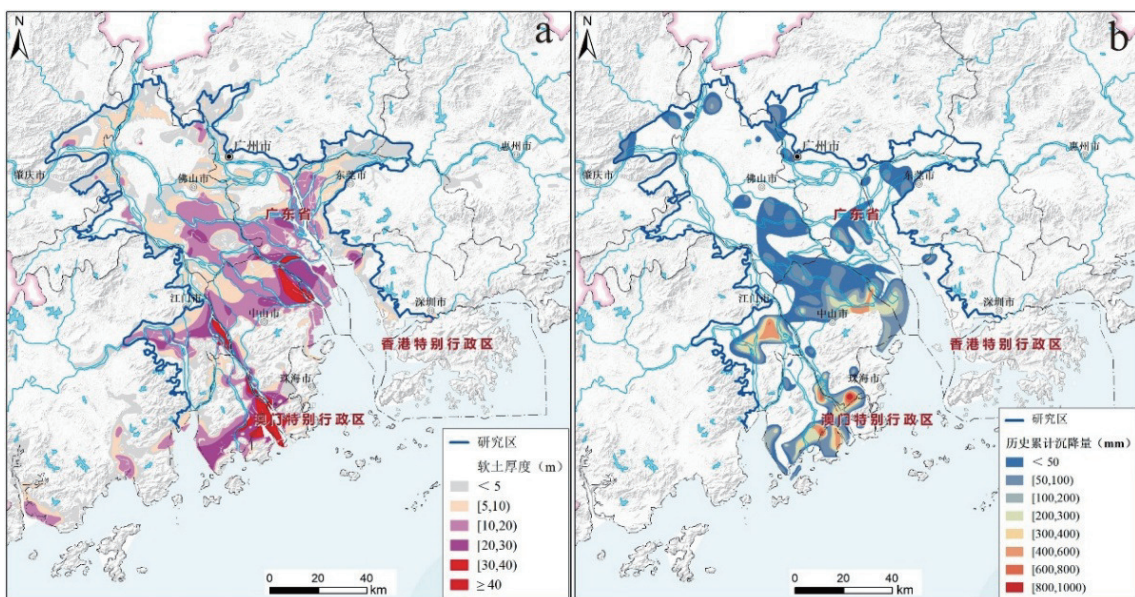


图 2 研究区软土厚度图 (a) 及历史累计沉降量等值线图 (b)

Fig. 2 Soft soil thickness map (a) and contour map of historical cumulative subsidence (b) in the study area

2 研究方法

2.1 AHP-模糊综合评价法

AHP-模糊综合评价法综合了层次分析法(AHP)与模糊综合评价法的优势,将行为科学和数学科学联系起来,深入探讨了模糊数学理论与风险评价领域的融合方案。该方法通过构建层次结构和引入隶属度函数和模糊集合等概念,能够将地面沉降风险评价问题分解为多个层次和多个因素,并对其模糊因素进行量化处理,从而得到更加准确、可靠的评价结果。这一方法在实际应用中具有广泛的适应性。其步骤如下:

首先构建层次结构模型,通常包括目标层、准则层和指标层,主要关注指标层,即:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (1)$$

其中, n 是评价因子的个数。随后确定评价指标的权重:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \quad (2)$$

其中, w_n 是第 n 个因子的权重,满足以下条件: $0 < w_i$, 且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。其次选择适应性评价因子建立评判集合:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (3)$$

对于每个评价因子 μ_i , 计算在各个评判等级上的隶属度后得到单因子的评价向量 μ_i , 将所有单因子的评价向量组合起来, 得到模糊评价矩阵 M 。

$$\mu_i = \{\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{im}\} \quad (4)$$

$$M = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{nm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中, μ_{ij} 表示第 i 个因子在第 j 个评判上的隶属度。将模糊评价矩阵 M 与权重向量 W 进行合成运算, 得到综合评价结果向量 B :

$$B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot w_i \quad (6)$$

其中, b_n 表示评价对象在第 n 个评判等级上的综

合隶属度。根据综合评价结果向量 B , 我们可以确定评价对象的最终评判等级。常用的方法包括最大隶属度原则, 选择 b_n 中最大值作为最终评判等级, 即:

$$b_r = \max b_j (1 \leq j \leq n) \quad (7)$$

2.2 风险评价方法

风险矩阵评估方法(RMM)的基本原理是将风险的可能性和影响程度进行矩阵化, 以便更直观地识别和评估风险。可通过分级函数的形式进行描述:

$$R = f(p, c) = [R_{ij}] \quad (8)$$

其中, R 表示风险; p 表示风险发生的概率; c 表示风险发生时的后果或影响。

3 地面沉降灾害评价与体系构建

3.1 InSAR 数据源

本文采集了 2016 年 8 月至 2019 年 6 月共计 42 景哨兵一号(Sentinel-1A)影像数据(数据类型: 升轨)作为数据源, 具体信息如表 1 所示。

通过选取 2018 年 2 月 11 日 SAR 影像作为超级主影像, 并根据时间基线阈值 365 d 和空间阈值 2% 进行合理参数设置, 对主副影像进行配准, 生成干涉图, 确保干涉对组合的相干性。根据筛选后的 115 组干涉对进行差分处理, 并结合 JAXA 发布 30 m 空间分辨率的 AW3D-DEM 数据消除地形相位影响, 利用 Goldstein 和 Minimum Cost Flow 方法进行相位解缠处理, 经转换得到地表形变结果, 实现对地表微小位移变化的精准监测。经过轨道精炼和重去平后, 进行两次反演估算形速率并去除大气等残余相位。最后对其结果进行地理编码, 得到投影后的垂直向形变结果。选用年均地面沉降速率与累计沉降量作为评价因子并进行量化分级。

采用 SBAS-InSAR 技术开展地表形变的动态研究, 得到珠江三角洲平原区年均地面沉降速率、累积沉降量等数据(图 3a、3b), 且监测结果与实际拟合情况较好, 下一步进入风险评价阶段。

表 1 Sentinel-1A 数据源
Table 1 Sentinel-1A data source

序号	成像时间	时间基线(d)	空间基线(m)	序号	成像时间	时间基线(d)	空间基线(m)
1	2016-08-20	-540	-24.920 1	22	2018-02-11	0	0
2	2016-09-25	-504	-71.512 2	23	2018-03-07	24	33.656 9
3	2016-10-19	-480	41.022 1	24	2018-03-31	48	33.093 7
4	2016-11-12	-456	22.889 4	25	2018-04-24	72	-4.500 8
5	2016-12-06	-432	-52.764 4	26	2018-05-18	96	-9.416 0
6	2016-12-30	-408	-23.241 3	27	2018-06-11	120	-20.259 8
7	2017-01-23	-384	24.555 9	28	2018-07-05	144	65.086 1
8	2017-02-16	-360	25.640 6	29	2018-07-29	168	48.479 1
9	2017-03-12	-336	17.366 1	30	2018-08-22	192	8.752 6
10	2017-04-05	-312	-30.681 4	31	2018-09-15	216	-33.161 5
11	2017-04-29	-288	19.877 5	32	2018-10-09	240	43.067 3
12	2017-05-23	-264	26.642 1	33	2018-11-02	264	-30.424 2
13	2017-06-28	-228	-13.928 8	34	2018-11-26	288	41.017 3
14	2017-07-22	-204	41.708 3	35	2018-12-20	312	96.948 6
15	2017-08-15	-180	-77.819 3	36	2019-01-13	336	-21.710 1
16	2017-09-08	-156	42.516 6	37	2019-02-06	360	95.716 0
17	2017-10-02	-132	-20.032 4	38	2019-03-02	384	-46.675 2
18	2017-10-26	-108	-71.275 9	39	2019-03-26	408	-68.881 7
19	2017-11-19	-84	19.473 8	40	2019-04-19	432	-85.673 1
20	2017-12-13	-60	56.150 8	41	2019-05-13	456	-19.038 8
21	2018-01-06	-36	19.380 88	42	2019-06-18	492	56.909 4

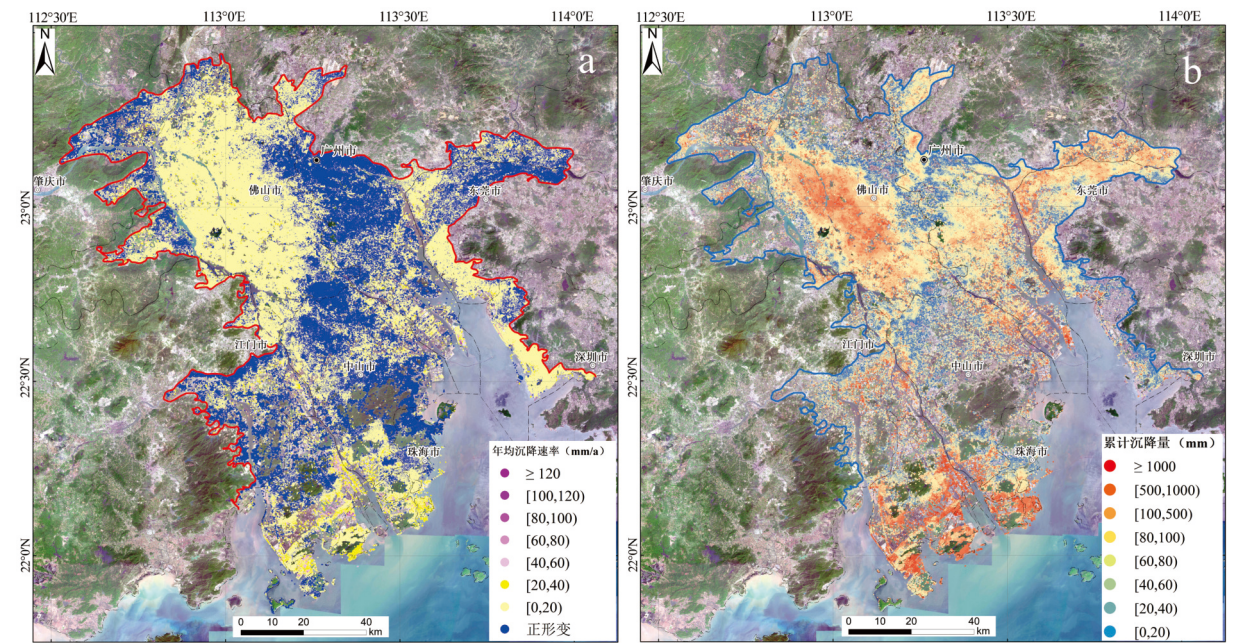


图 3 研究区年均地面沉降速率 (a) 及累计沉降量 (b)
Fig. 3 Annual average rate of land subsidence (a) and cumulative subsidence amount (b) in the study area

3.2 地面沉降风险评价因素

(1) 沉降危险性因素

地面沉降危险性,是指特定区域在某时段内受多种诱发因素综合作用下发生沉降灾害的可能性。本文依据《地质灾害危险性评估规范》(GB/T 40112—2021)([国家市场监督管理总局和国家标](#)

[准化管理委员会, 2021](#))技术标准,结合常用指标体系同时考虑实际情况与数据可获取性,重点针对研究区第四纪沉积层发育、海陆交互作用显著等区域特性,构建区域沉降危险性评价指标体系。其中:地质基础属性涵盖地层岩性组合、软弱土层分布厚度、构造格局与地形基底;动力驱动因

子整合年降水率、地下水开采强度等动态参数;沉降历史特征则通过历史累计形变量进行量化表达。各项指标因子等级划分及其危险性赋值情况如表 2 所示。

表 2 研究区地面沉降危险性指标及其量化分级

Table 2 Land subsidence risk index and quantitative classification in the study area

贡献率	高	较高	中	较低	低
	5	4	3	2	1
软土厚度(m)	> 30	30 ~ 20	20 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 0
地层岩性	易压缩	可压缩	较坚硬	坚硬	极坚硬
距构造断裂(m)		< 300	300 ~ 600	600 ~ 900	> 900
地下水利用强度		高	中	低	极低
大气降水(mm)	>2000	1 800 ~2000	1 600 ~ 1 800	1 400 ~ 1 600	< 1 400
河网缓冲区(m)		< 500	500 ~ 1 000	1 000 ~ 1 500	> 2 000
高程(m)		< 10	10 ~ 50	> 50	
累计形变量(mm)	> 300	300 ~ 200	200 ~ 100	100 ~ 50	< 50

(2)沉降易损性因素

地面沉降易损性主要通过受灾区域内的人口密度、经济活动、基础设施布局以及公众防灾意识等社会经济要素来表征。在分析区内自然地质条件与受灾区域的社会经济特征的基础上,本文从不同承灾体属性出发,即人员与经济承灾体两个方面,选择了人口密度、建筑密度、道路密度、单位面积 GDP 和土地利用强度作为评估珠江三角洲平原区地面沉降易损性的关键指标(表 3)。

对此,采用模糊综合评价法对上述指标进行权重分配与综合评价。通过专家咨询与文献调研,确定各指标的相对重要性并构建判断矩阵,得到指标权重,最终结合各指标的具体数据进行加权求和,可以得出地面沉降易损性的评估结果,依次呈现为高、较高、中等、较低、低易损性。此外,为避免以传统行政单元为评价单元时可能忽略部分指标要素于范围内分布不均匀的情况,本文将全区划分固定大小的栅格单元作为分析基础。

表 3 研究区地面沉降易损性指标及其量化分级

Table 3 Vulnerability index of land subsidence and quantitative classification in the study area

贡献率	高	较高	中	较低	低
	5	4	3	2	1
人口密度		稠密	适宜	稀疏	极度稀疏
道路密度(km/km ²)		> 7.19	4.55 ~ 7.19	3.13 ~ 4.55	0 ~ 3.13
建筑密度(km/km ²)		> 10.2	7.3 ~ 10.2	3.6 ~ 7.3	0 ~ 3.6
单位面积GDP(亿元/ km ²)		> 12	4 ~ 12	2 ~ 4	0 ~ 2
土地利用强度	高	较高	中	较低	低

3.3 地面沉降风险评价模型

在构建危险性评价体系过程中,本文采用 AHP-模糊综合评价法依照层次分析模型结构,明确目标层、准则层及指标层,建立了如表 4 所示的指标体系并得到了各级指标的权重,判断矩阵的最大特征根为 $\lambda_{\max}$ =3.07, CR<0.1, 表明判断矩阵具有较好的一致性。随后根据二级指标权重与 5 个评语集(高、较高、中等、较低、低)进行模糊

综合评价,在使用加权平均型算子进行研究,得到评语集隶属度分别为 0.061、0.155、0.268、0.262、0.252,集合最大隶属度法则得到最终综合评价的结果为“中等”。

基于 AHP-模糊综合评价法得到地面沉降易损性评价因子权重结果如表 5 所示,权重分配过程符合逻辑一致性和计算规范要求,同时评语集隶属度分别为 0.22、0.34、0.60、0.51、0.26,根据

表 4 研究区地面沉降危险性评价体系表

Table 4 Land subsidence risk assessment system in the study area

一级指标	二级指标	权重
地质基础属性	软土厚度	0.232
	地层岩性	0.123
	构造断裂	0.087
	高程	0.082
动力驱动因子	地下水利用	0.117
	河网缓冲区	0.109
	大气降水	0.076
灾害历史特征	累计形变量	0.174

最大隶属度法, 最终评价结果为“中”。

风险性可归因于特定自然灾害的预期损失。本文整体分析地面沉降发生的可能性(危险性)及

其潜在损害程度(易损性), 以界定风险级别。基于上述对地面沉降危险性和易损性的评价结果, 进一步构建地面沉降风险分类矩阵, 明确所面临的沉降风险状况, 划分为高风险、较高风险、中风险、较低风险和低风险五个等级, 如表 6 所示。

表 5 研究区地面沉降易损性评价体系表

Table 5 Vulnerability assessment system for land subsidence in the study area

一级指标	二级指标	权重
人员承灾体	人口密度	0.232
	建筑密度	0.129
	土地利用强度	0.102
经济承灾体	单位面积GDP	0.360
	道路密度	0.177

表 6 研究区地面沉降风险性等级划分表

Table 6 Risk classification of land subsidence in the study area

风险程度		易损性(Vulnerability)				
		高HV	较高MHV	中MV	较低LV	低VLV
危险性 (Risk)	高HR	HH-RV	HMH-RV	HM-RV	HL-RV	HVL-RV
	较高MHR	MHH-RV	MHMH-RV	MHM-RV	MHL-RV	MHVL-RV
	中MR	MH-RV	MMH-RV	MM-RV	ML-RV	MVL-RV
	较低LR	LH-RV	LMH-RV	LM-RV	LL-RV	LVL-RV
	低VLR	VLH-RV	VLMH-RV	VLM-RV	VLL-RV	VLVL-RV

4 讨论

4.1 评价结果分析

基于 AHP-模糊综合评价法得到珠江三角洲平原区地面沉降危险性评价结果(图 4a, 表 7), 对全区危险性分区统计结果显示, 高危险区在中山市坦洲镇新合村-群联村呈块状分布, 珠海斗门区灯笼沙广佛江珠沿线与鸡啼门水道沿岸两侧集中片状分布, 磨刀门水道沿线大鳌镇-禄围村呈条带状展布, 面积约 110.84 km²。较高危险区离散小面积分布于广州南沙区东涌镇东北部、万顷沙南端、中山市小榄水道小榄镇, 块状分布于中山港口镇中南部、三角镇-民众街道, 集中片状分布于磨刀门水道及鸡啼门水道沿岸两侧等地, 面积为 330.82 km²。上述区域主要位于三角洲冲积平原地带, 软土厚度普遍超过 20 m, 且多为城镇和工业园

集中区。另外, 中等危险区、较低危险区和低危险区分别占全域面积的 17.49%、53.69% 和 24.81%。区内沉降危险性空间格局对基础设施构成潜在威胁。值得注意的是, 广珠铁路与广佛江珠高速等交通干线的部分路段处于较高危险区覆盖范围内, 鉴于其对区域经济发展的支撑作用, 其潜在的沉降变形风险亟需引起高度重视。

此外, 综合影响因素分析, 研究区高危险区和较高危险区主要集中在岩性脆弱的粉砂岩、泥岩及细碎屑岩岩组区域、软土厚度 30 m 以上、在构造断裂或河网附近且降雨量较多的地区。上述分布特征与诱发因素的实际情况相符, 同时与重点沉降区的空间分布高度吻合。例如, 2019 年珠海斗门区时代香海彼岸楼盘广场发生大面积地面塌陷事件与本研究划定的高危险区域高度重合, 验证了区划结果的现实准确性。

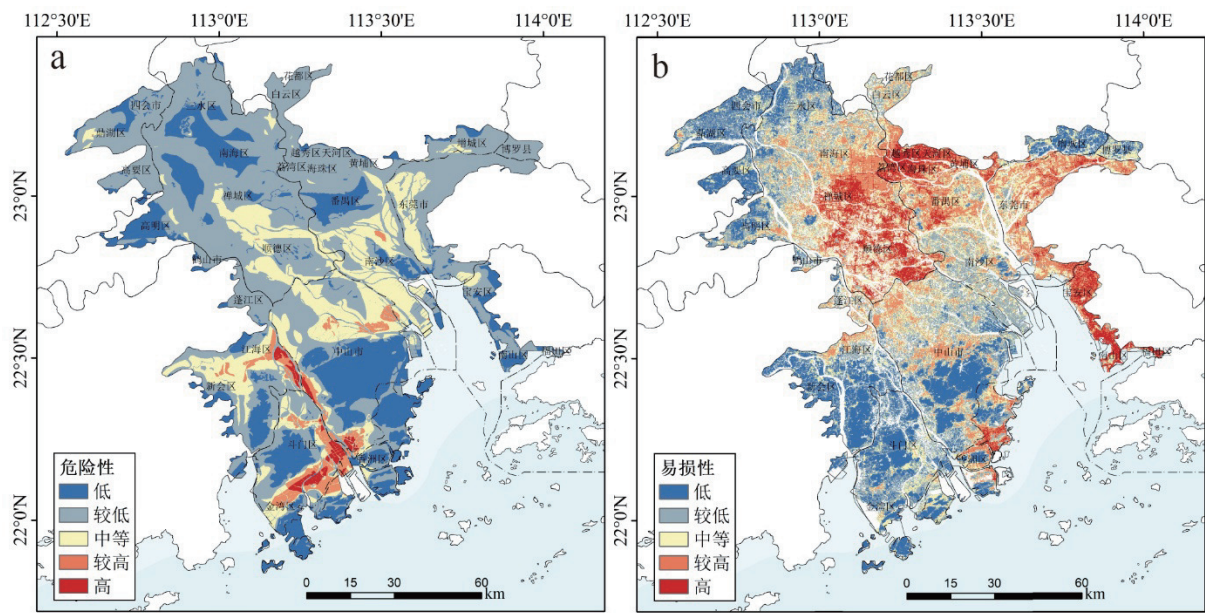


图 4 研究区地面沉降危险性分区图 (a) 易损性分区图 (b)

Fig. 4 Zoning map of land subsidence hazard (a) and vulnerability (b) in the study area

表 7 研究区地面沉降危险性及易损性分区统计结果

Table 7 statistical results of risk and vulnerability zoning of land subsidence in the study area

风险分级	危险性		易损性	
	面积(km ²)	占比(%)	面积(km ²)	占比(%)
高	110.84	1.03	853.6	7.75
较高	330.82	2.98	2269.3	20.58
中	1929.75	17.49	2705.1	24.54
较低	5923.43	53.69	2729.3	24.76
低	2737.26	24.81	2465.7	22.37

研究区地面沉降易损性评价结果(图 4a)表明,全域内大部分地区表现为中等及以上易损性,局部地区以低和较低易损为主。其中高易损区面积为 853.6 km², 占全区总面积的 7.75%, 主要分布在各市区中心, 如广州天河区、越秀区与海珠区、禅城区祖庙街道、深圳宝安区等地, 这些地区城市化程度高, 建筑物和人口较为密集, 发生沉降对经济损失和社会影响较大。较高易损区面积为 2269.3 km², 占全区总面积的 20.58%, 呈环带状分布于高易损区外围, 涵盖中山石岐区街道、东莞市麻涌镇、望牛墩镇、虎门镇、高明区荷城街道、南海区大沥镇与桂城街道、白云区金沙街道与新市街道、珠海拱北街道及江门会城街道等地。中易损区面积为 2705.1 km², 占全区总面积的 24.54%, 广泛分布于城市群外围的城镇过渡带, 以佛山顺德区龙江镇、中山横栏镇及县城中心镇为代表。较低及以下易

损区约占研究区面积的 47.13%, 主要分布在一些人类活动稀少的山地、未利用地和养殖坑塘区域。

基于上述对地面沉降危险性和易损性的评价结果, 进一步构建地面沉降风险分类矩阵, 明确研究区内所面临的沉降风险状况, 划分为高风险、较高风险、中风险、较低风险和低风险五个等级, 如图 5 所示。

评价结果表明, 研究区内地面沉降高风险区面积约为 63.8 km², 占研究区总面积的 0.58%。该风险等级区总体呈零散、小范围斑块状分布。空间上主要分布于珠海金湾区西北部、斗门区白蕉镇及中山坦洲镇, 并零星见于江门大鳌镇、佛山勒流街道等局部地区。较高风险区面积约为 371.8 km², 占研究区总面积的 3.38%, 除环绕高风险区形成过渡带外, 主要分布在各中心城区, 涵盖区域包括佛山禅城区西部、顺德区西北部、广州

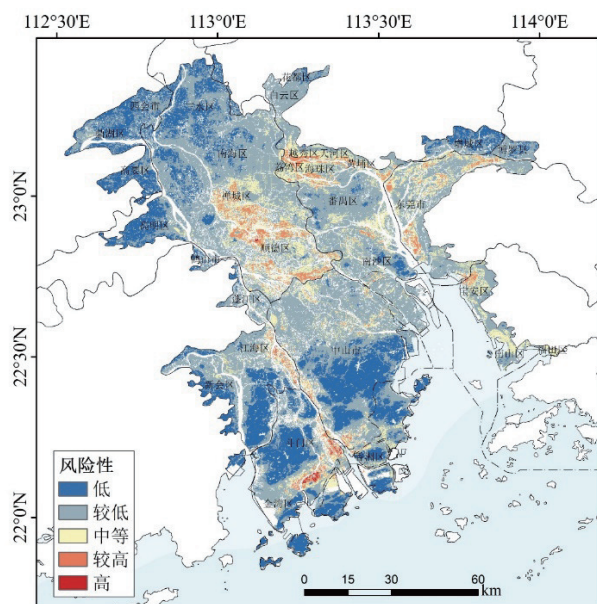


图 5 研究区地面沉降风险性分区图

Fig. 5 Zoning map of land subsidence risk in the study area

天河区、越秀区及深圳宝安区西部等城市化水平高、人口与基础设施高度密集区域。鉴于较高及以上风险区较为集中分布于珠江三角洲城市群的核心区域,且人口高度聚集、建筑物与地下管网等基础设施复杂密集、经济活动强度大。一旦发生显著地面沉降,易对各类基础设施造成结构性损害,并可能扰动城市系统的正常运行。另外,中等风险区占全区总面积的 12.39%,在区内多个城市均有分布,主要集中在珠海中部、中山北部、江门新会区西部和佛山西北部。其余较低和低风险区覆盖研究区的大部分区域,以植被覆盖区为主,人类工程活动强度相对较低、潜在承灾体密度与价值相对较小。

4.2 沉降管理和预防

地面沉降风险的管理与控制依赖于科学的风险评估,并在此基础上进行风险分区,以便采取针对性的管控策略。基于地面沉降风险的评价结果与实际情况,将人口密集区、学校、医院、关键基础设施所在部位等关键地带划定为地质灾害重点防治区;而其余区域则归类为一般防治区。

重点防治区: 针对于现阶段大规模建设活动区域,致力于强化地面沉降的防控,具体措施包括减少地下水开采量,加强对深基坑等建设活动可能引发的地面沉降的监测与管理,以及增设与工

程建设密切相关的浅部含水层地下水监测井。对于主城区部分区域,若条件允许,可适当实施人工回灌。此外,还需完善地面沉降与地下水监测网络,并加大对防灾减灾知识的宣传培训力度,以提升公众的地质环境保护意识。

一般防治区: 侧重于优化地下水开采顺序,加强重点区域地面沉降监测网络的建设。需准确把握导致地面沉降的主要因素,并严格控制与调节地面沉降风险评价指标,以降低风险。同时,加强防灾减灾知识的宣传,提高公众的地质环境保护意识。

5 结论

(1) 基于 SBAS-InSAR 数据源结合 AHP-模糊综合评价模型,得到珠江三角洲平原区地面沉降高危险区(面积 110.84 km^2 , 占全区 1.03%)主要分布于珠海白蕉镇、中山坦洲镇等软土深厚区域,较高易损区(面积 853.6 km^2 , 占全区 7.75%)集中于广州天河区、深圳宝安区等城市核心区,高风险区(面积 63.8 km^2 , 占全区 0.58%)则分布于顺德容桂街道、珠海白蕉镇等人口与基建密集地带,风险分布整体与地质条件、城市化水平相关。

(2) 危险性主控因素为软土厚度(权重 0.232)、地层岩性(权重 0.123)及累计形变量(权重 0.174),易损性核心指标为人口密度(权重 0.232)、单位面积 GDP(权重 0.360)与道路密度(权重 0.177)。全区整体风险性较低,但局部高危险区与高易损区的空间叠加显著放大了灾害风险。

(3) 针对重点防治区(如城市中心、交通干线),需加强地下水开采管控、优化浅层含水层监测网络,局部区域适当实施人工回灌;一般防治区应注重风险指标动态调控(如土地利用强度)、完善监测体系,同时提升公众防灾意识,以实现风险分级管理与可持续发展目标的协同。

参考文献:

戴真印,刘岳霖,张丽平,张 贤. 2023. 基于改进时序 InSAR 技术的东莞地面沉降时空演变特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 34(1): 58-67.

- 高峰,赵团芝,王文军,章句立,郑凌透.2023.宁波市地面沉降现状分析及风险评价[J].中国地质灾害与防治学报,34(6):127-135.
- 高磊,陈运坤,屈尚侠,余革森.2020.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,51(S2):94-97+157.
- 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.2021.地质灾害危险性评估规范 GB/T 40112—2021[S].
- 黄建龙,刘亦农,曾伟国.2019.粤港澳大湾区地质特点与地质环境保护策略分析[J].人民珠江,40(9):103-109.
- 姜守俊.2013.内伶仃岛以北海域填海造地活动及其引发的环境地质问题探讨[J].广东水利水电,(5):16-19.
- 林超奇,陈克杰,梁存任,朱海,李明佳,崔文峰,柴海山.2023.基于 InSAR 和高密度 GNSS 的粤港澳大湾区地面沉降监测与深度学习预测[C].珠海:中国地球科学联合学术年会.
- 刘晓.2022.基于 AHP 的吉林省辽源市地质灾害危险性评价[J].首都师范大学学报(自然科学版),43(5):35-43.
- 刘颖琛,夏少红,张昌榕,王新洋.2021.基于背景噪声的粤港澳大湾区上地壳三维速度结构研究[C].珠海:中国地球科学联合学术年会.
- 庞栋栋,刘刚,何敬,王彬,赵绪强.2021.基于层次分析法的甘肃省地质灾害风险评估分析[J].自然资源信息化,(6):41-47.
- 王会强,冯光财,喻永平,毛晓康,丁超,陈晨月.2016.基于 C 波段和 L 波段的 SBAS-InSAR 技术监测广州地面沉降[J].测绘工程,25(11):60-64+71.
- 王颖,王志一,纪轶群.2022.北京地质灾害风险评价研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),43(3):54-61.
- 谢先明,王松,李明,周振钊,吴丽霞.2021.珠江三角洲地区地面沉降现状及成因分析[J].西部探矿工程,33(8):8-10.
- 薛禹群,张云,叶淑君,李勤奋.2003.中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J].第四纪研究,(6):585-593.
- 闫斌,董建军,梅媛,刘士乙.2023.高海拔石灰石排土场汛期潜在滑移区域的 D-InSAR 评价研究[J].安全与环境工程,30(6):162-168.
- 殷跃平,张作辰,张开军.2005.我国地面沉降现状及防治对策研究[J].中国地质灾害与防治学报,6(2):1-8.
- 于海若,官辉力,陈蓓蓓,刘凯斯.2020.京津冀地区地面沉降研究进展与思考[J].测绘科学,45(4):125-133+141.
- 余革森,李德洲,屈尚侠.2017.广州市软土地面沉降特征分析[J].上海国土资源,38(2):22-25.
- 曾敏,皮鹏程,赵信文,陈松,彭红霞,侯清芹,孙慧敏,薛紫萱.2023.基于 PS-InSAR 的珠江口典型填海造地区地面沉降时空特征研究[J].华南地质,39(1):116-126.
- 赵团芝,侯艳声,胡新锋.2016.宁波市工程性地面沉降成因分析及防治对策研究[J].上海国土资源,37(3):60-64.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(11): 2375-2383.
- Barends F B J, Brouwer F J J, Schröder F H. 1995. Land subsidence[C]. Proceedings of the fifth international symposium on land subsidence, the Hague, Netherlands, 16-20 october 1995. Rotterdam: Balkema, 128-138.
- Gambolati G, Teatini P, Tomasi L. 1999. Coastline regression of the Romagna region, Italy, due to natural and anthropogenic land subsidence and sea level rise[J]. Water Resources Research, 35(1): 163-184.
- Ohenhen L O, Shirzaei M, Ojha C, Sherpa SF, Nicholls R J. 2024. Disappearing cities on US coasts[J]. Nature, 627: 108-115.
- Miura N, Taesiri Y, Sakai A. 1988. Land subsidence and its influence to geotechnical aspect in Saga plain[R]. Proceeding of the international symposium on shallow sea & lowland. Saga: Saga University.
- Teatini P, Ferronato M, Gambolati G, Bertoni W, Gonella M. 2005. A century of land subsidence in Ravenna, Italy[J]. Environmental Geology, 47(6): 831-846.
- Ao Z R, Hu X M, Tao S L, Hu X, Wang G Q, Li M J, Wang F, Hu L T, Liang X Y, Xiao J F, Yusup A, Qi W H, Ran Q W, Fang J Y, Chang J F, Zeng Z Z, Fu Y S, Xue B L, Wang P, Zhao K F, Li L, Li W K, Li Y M, Jiang M, Yang Y H, Shen H H, Zhao X, Shi Y, Wu B, Yan Z B, Wang M J, Su Y J, Hu T Y, Ma Q, Bai H, Wang L J, Yang Z Y, Feng Y H, Zhang D H, Huang E H, Pan J M, Ye H Y, Yang C, Qin Y W, He C Q, Guo Y P, Cheng K, Ren Y, Yang H T, Zheng C Y, Zhu J L, Wang S P, Ji C J, Zhu B, Liu H Y, Tang Z Y, Wang Z H, Zhao S Q, Tang Y H, Xing H F, Guo Q H, Liu Y, Fang J Y. 2024. A national-scale assessment of land subsidence in China's major cities[J]. Science, 19:384(6693): 301-306.