

宁波市地面沉降现状分析及风险评价

高峰, 赵团芝, 王文军, 章旬立, 郑凌透

Analysis and risk evaluation of current land subsidence in Ningbo City

GAO Feng, ZHAO Tuanzhi, WANG Wenjun, ZHANG Xunli, and ZHENG Lingwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202210035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江苏盐城地面沉降风险评价

建议文章标题

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

安徽阜阳中心城区地面沉降灾害风险评价

建议文章标题

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

基于灰色Verhulst模型的山西太原地面沉降趋势分析

建议文章标题

周艳萍 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(2): 94-99

珠江三角洲平原区地面沉降影响因素分析

建议文章标题

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

应用地理探测器改进地面沉降危险性评估模型的研究

建议文章标题

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

广州市白云区夏茅村岩溶地面塌陷特征及致灾因素和风险分析

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

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202210035

高峰, 赵团芝, 王文军, 等. 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, 2023, 34(6): 127-135.

GAO Feng, ZHAO Tuanzhi, WANG Wenjun, et al. Analysis and risk evaluation of current land subsidence in Ningbo City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 127-135.

宁波市地面沉降现状分析及风险评价

高峰¹, 赵团芝¹, 王文军², 章旬立², 郑凌透²

(1. 宁波市自然资源生态修复和海洋管理服务中心, 浙江 宁波 315000;

2. 浙大宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100)

摘要: 针对宁波市地面沉降发展现状及风险评价需求, 结合 2017—2020 年的 InSAR 遥感监测数据与沉降点监测数据, 对近年地面沉降特征进行了分析。在此基础上建立了包括地面高程、沉降易发程度、地面累计沉降量、沉降速率、城市人口密度、建设用地占比等 6 个评价因子为主的地面沉降风险评价体系。其中沉降易发程度为综合考虑地质条件、水文地质条件、人为活动影响后的综合性评价因子。地面沉降风险评价结果表明: 宁波市地面沉降无高易发区, 中、低易发区主要与区内全新世软土层厚大、历史上大量开采地下水、局部高强度城市建设以及沿海围垦工程等因素有关。最后, 划分了地面沉降中风险区、低风险区、风险防控带, 并提出了相应的地面沉降风险区管控建议。

关键词: 地面沉降; 遥感监测; 易发程度; 风险区划; 管控建议

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)06-0127-09

Analysis and risk evaluation of current land subsidence in Ningbo City

GAO Feng¹, ZHAO Tuanzhi¹, WANG Wenjun², ZHANG Xunli², ZHENG Lingwei²

(1. Ningbo Administration and Service Centre for Marine and Ecological Restoration of Natural Resources, Ningbo, Zhejiang 315000, China; 2. School of Civil Engineering & Architecture, Ningbo Tech University, Ningbo, Zhejiang 315100, China)

Abstract: In response to evaluating the current status and assessing the risk assessment requirements of land subsidence in Ningbo City, the characteristics of land subsidence in recent years were analyzed using InSAR remote sensing monitoring data and subsidence point monitoring data from 2017 to 2020. Based on this analysis, a land subsidence risk assessment system has been developed, primarily consisting of six evaluation factors, including ground elevation, susceptibility to subsidence, cumulative ground subsidence, subsidence rate, urban population density, and the proportion of construction land usage. The susceptibility to subsidence is a comprehensive evaluation factor that takes into account geological conditions, hydrogeological conditions, and the impact of human activities. The results of the land subsidence risk assessment indicate that there are no high-risk susceptibility zones for land subsidence in Ningbo City. Medium and low-risk susceptibility zones are primarily associated with factors such as the thick layers of the Holocene soft soil, historical excessive groundwater extraction, localized high-intensity urban development, and coastal land reclamation projects within the region. Finally, the areas were categorized into medium-risk, low-risk, and risk prevention zones, along with corresponding control recommendations for land subsidence risk management.

收稿日期: 2022-10-22; 修订日期: 2023-04-22

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY19E080013; LQ19E080009); 浙江省建设科研项目(2022K112); 闽北山地地质灾害防治福建省高校工程研究中心开放基金项目(WYERC2020—1)

第一作者: 高峰(1971-), 男, 安徽黄山人, 本科, 高级工程师, 主要从事地质灾害预报与防治工作。E-mail: gf_ep398@126.com

Keywords: land subsidence; remote sensing monitoring; susceptible level; risk zonation; control recommendations

0 引言

城市地面沉降表现为自然与人类活动作用下,地表土层压缩变形、标高降低,是一种危害较大的缓变型环境地质灾害^[1-2],威胁着低海拔城市运行安全与可持续发展。

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^[3-6]开展了广泛研究。在地面沉降风险评价方面,赵团芝等^[7-8]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。工程建设活动及第一软土层压缩变形是宁波市工程性地面沉降的主要原因。选取累计沉降量、沉降速率、第一软土层厚度、建筑容积率作为地面沉降风险性评价指标,绘制宁波市地面沉降风险区划图并提出地面沉降防治对策。

风险评价被认为是一种能够有效管控滑坡、地面沉降、泥石流等灾害的理论方法。天津^[9-10]、江苏沿海地区(连云港、盐城、南通)^[11]、南京^[12]、沧州^[13]、北京^[14]和阜阳^[15]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、经济带来损失^[16]。InSAR 技术能够在较大的范围监测地面沉降^[17],但精度低于水准监测点;水准监测点适用于局部埋设,地面沉降结果更加准确^[18],但由于成本原因布设数量有限、覆盖范围较小。

本文利用宁波市 2017—2020 年已有 InSAR 监测、水准监测、基岩标等监测数据,从而在较大的区域范围内相对可靠地获取地面沉降监测数据,系统分析近年地面沉降分布特征和发展趋势,建立宁波市地面沉降风险评价体系,编制地面沉降风险区划图,从而为加强城市地质安全风险管控提供参考。

1 宁波市地面监测情况及沉降特征

1.1 地面沉降监测情况

宁波市历来重视地下水监测和地面沉降监测。宁波市地面沉降监测中心始建于 1983 年,曾是国内第三处较为先进的地质环境监测中心;1999 年宁波市启动了首期“宁波市区地面沉降水准监测”项目;2014 年在

原地面沉降分层标的基础上新建地面沉降监测中心,监测范围覆盖宁波绕城高速以内的中心城区;同年,宁波启动了基于 InSAR 的地面沉降监测工作。本文采用 5 m 分辨率 Radarsat-2 C InSAR 遥感数据,使用卫星定位校正图像数据,以提高雷达图像的准确性和精度;InSAR 数据处理主要包括预处理、差分干涉计算、时间/空间域形变估算、形变量计算等几个步骤,最终获得平均沉降速率和累积沉降量。

1.2 地面沉降特征

对 InSAR 遥感监测数据与全市 400 余处沉降监测点数据统一分析,全市 2020 年平均沉降速率约为 5.67 mm/a,年沉降量低于 5 mm 的区域面积为 1 457.9 km²。宁波市形成的 10 余个地面沉降带,大多位于围垦区域、城市开发建设热点区域,地面沉降速率如图 1 所示,其中 10 余处沉降带分布见表 1。

对宁波市 2020 年不同地面沉降速率范围的区域面积占比进行统计(图 2)。

可以看到:除了水系、地面沉降不易发区和基岩山区以外,沉降速率低于 10 mm/a 的区域面积占比接近 88%,全市大部分区域的地面沉降情况稳定、相对安全。沉降速率在 10~20 mm/a 的区域面积占比为 8.63%,沉降速率在 20~30 mm/a 的区域面积占比为 2.90%,沉降速率高于 30 mm/a 的区域面积占比为 0.42%。鄞州中心区和东部新城的代表性监测点沉降量历年变化情况显示,随着城市开发建设的逐步完成,2 个区域的沉降速率逐渐减缓,近 3 年沉降速率达到了历年的最低水平,但今年的沉降速率相较于全市平均沉降速率水平仍然偏高。

由图 1 和图 2 总结宁波市地面沉降速率分布特征如下:

(1)滨海区域沉降速率相对较大。鄞州瞻岐、北仑梅山岛等多处滨海区域沉降中心的平均沉降速率大于 10 mm/a,其中最大值出现在象山新桥镇围填海区域,沉降中心平均沉降速率大于 30 mm/a。

(2)城市开发建设强度较大的区域沉降速率相对较大。南部商务区、东钱湖旅游度假区等区域沉降中心的平均沉降速率多在 20~40 mm/a。

(3)中心城区沉降速率相对较大。海曙高桥、江北洪塘等主要沉降中心的沉降速率多在 10~30 mm/a。

综上所述,工程建设引发的地面沉降在城市规划建设集聚区日益凸显,比如东部新城、鄞州中心区、奉化

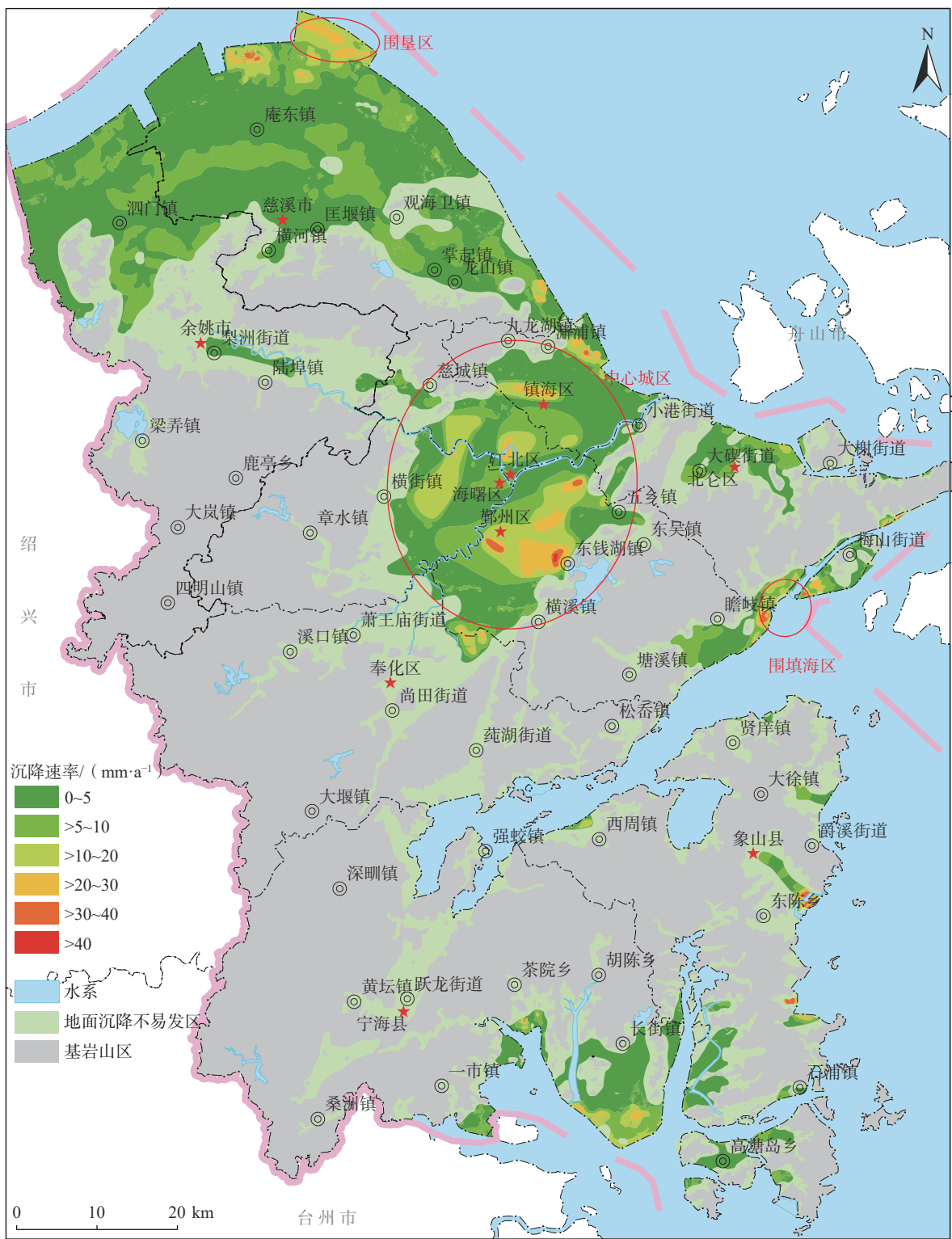


图 1 宁波市地面沉降速率概况

Fig. 1 Overview of land subsidence rates in Ningbo City

主城区和沿海产业带等开发强度大、地质环境条件脆弱的地区年度沉降速率较大;大规模工程建设活动是宁波市地面沉降发生发展的主要因素,在后续地面沉降风险评价体系构建中需加以考虑。

2 地面沉降风险评价体系构建

2.1 评价体系说明

地面沉降风险评价属于对复杂系统的定量化分析

表 1 地面沉降风险区划影响因素数据来源

Table 1 Data sources of influencing factors for land subsidence risk zoning

序号	沉降带名称	沉降中心
1	杭州湾—泗门沉降带	前湾新区余姚泗门
2	龙山—漕浦—招宝山沉降带	镇海化工区
3	新碶—霞浦—大榭沉降带	新碶大榭沿海区域
4	瞻岐—春晓—梅山沉降带	大嵩新区、春晓梅山围填海区
5	余姚凤山—阳明—河姆渡沉降带	凤山、阳明街道
6	骆驼—庄桥—洪塘—高桥—集士港沉降带	骆驼、庄桥、洪塘街道、高桥、集士港镇
7	东部—鄞南—江口—西坞沉降带	高新区、东部新城、南部商务区、江口、西坞街道
8	环象山港沉降带	奉化莼湖、松岙、象山西周、贤岸
9	新桥—东陈—丹城—大徐沉降带	新桥、大目湾新城、大徐
10	长街—高塘—南田沉降带	南部滨海新区、象山高塘、南田

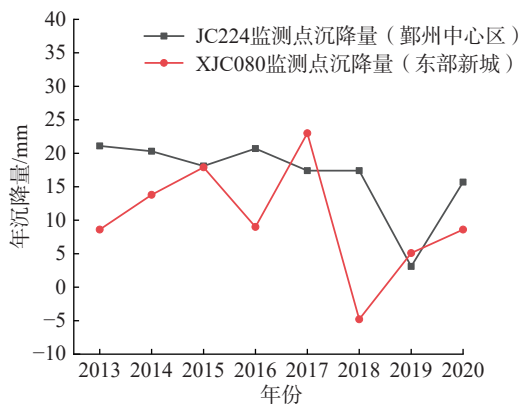
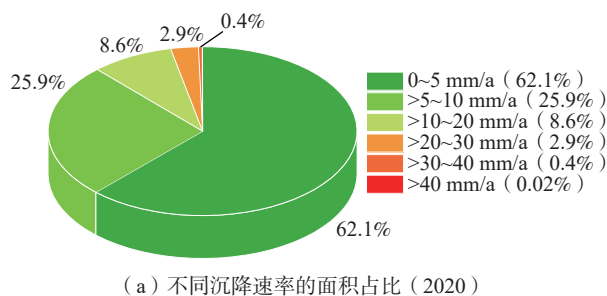


图 2 宁波市地面沉降速率图

Fig. 2 Land subsidence rate map of Ningbo City

过程。一般采用线性加权模型，而权系数的确定又可通过层次分析、专家打分或二者综合得出^[19]。地面沉降的风险评价模型通常可表示为： $I = I_{\text{危险性}} \cdot I_{\text{易损性}}$ ，分析灾害因子的危险性、承灾体的脆弱性，根据地面沉降危险性评价指标、易损性评价指标结合风险评价模型开展宁波市地面沉降风险评价研究。前人研究^[3, 7, 19]表明地面沉降危险性评价指标中具有代表性的因子主要包

括：地面累计沉降量、沉降速率、软土层厚度、填土厚度、地面建筑荷载、地下水位变化速率、地壳运动速率等；地面沉降易损性评价指标中具有代表性的因子主要包括：地面高程、沉降易发程度、交通线路分布、人口密度、单位面积 GDP、建成区面积比重、重要水系密度等。

除了地面高程、地面累计沉降量、沉降速率等常规地面沉降风险因子，对于人口净流入为正、城市建设高速发展的宁波市，城市人口密度、建设用地比重也应被重点考虑。从宁波市不同区域的地面沉降历史数据来看，地面沉降速率较高的区域如市区、滨海围垦区域、城市开发热点区域等，与上述因子密切相关。

宁波市位于中国东南沿海的潮汐平原区，具有深厚软土层和广泛分布的松散层，含水层较多；地下水开采强度对地面沉降的影响已深入人心，且多年平均沉降速率预示着沉降易发程度，因此对于宁波市而言，除了地面沉降危险性评价因子、易损性评价因子，地面沉降易发程度作为 1 个综合性评价因子十分必要。

因此，本文构建的地面沉降风险评价体系如图 3 所示。首先考虑地质条件、水文地质条件、人为活动等的影响，对地面沉降易发程度进行分区，进而将地面沉降易发程度作为地面沉降风险评价体系中的 1 个综合性评价因子，并联合地面高程、地面累计沉降量、沉降速率、城市人口密度、建设用地比重等 5 个评价因子进行评价。

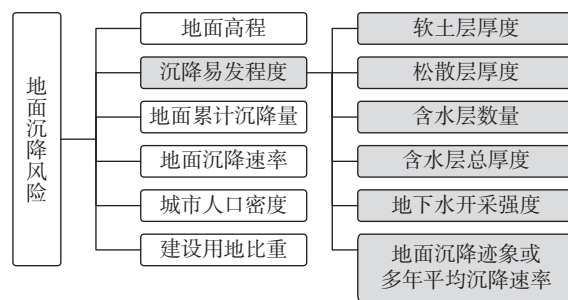


图 3 宁波市地面沉降风险评价体系

Fig. 3 Land subsidence risk assessment system for Ningbo City

2.2 评价体系权重及分级

浙江省自然资源厅印发的《浙江省城市地质安全风险“一张图”编制技术指南》根据浙江省沿海平原地面沉降形成机理，结合长期地面沉降监测成果，通过“经验总结+专家打分”相结合的方法，采用如德尔菲法 (delphi method) 或层次分析法 (analytic hierarchy process,

AHP)来汇总专家的意见、通过多轮迭代和反馈,使专家意见逐渐收敛,综合确定了各评价指标权重。各项指标权重及等级划定见表2。

表2 地面沉降风险区划影响因素权重及分级
Table 2 Weight and classification of factors influencing land subsidence risk zoning

影响因素	权重 (a_j)	影响因素分级及分值(b_j)		
		3	2	1
地质条件	地面高程/m	0.2	<2	2~4
	易发程度	0.1	高易发	中易发 低易发
沉降特征	地面累计沉降量/mm	0.2	>1 000	500~1 000 <500
	沉降速率/(mm·a ⁻¹)	0.3	>40	20~40 <20
社会经济 发展指标	城市人口密度/(万人·km ⁻²)	0.1	0.2	0.1~<0.2 <0.1
	建设用地比重/%	0.1	>60	30~60 <30

通过逐一确定各评价因素的等级,再将各因素等级分值与其权重相乘得到单因素分值,最后将各因素分值累加,从而得到地面沉降综合风险指数(W),按表3划分风险区等级。轨道交通建设过程中地下盾构隧道开挖也容易引起地面沉降发生发展^[20-22],根据浙江省自然资源厅印发的《浙江省城市地质安全风险“一张图”编制技术指南》,将高铁、轨道交通等重大工程保护区两侧200 m范围划为地面沉降风险防控带。

表3 地面沉降风险区等级划分表
Table 3 Classification table of land subsidence risk zone levels

风险区等级	高风险区	中风险区	低风险区
地面沉降综合风险指数(W)	>2.5~3.0	1.5~2.5	<1.5

综合风险指数(W)计算公式如下:

$$W = \sum_{j=1}^n a_j \cdot b_j \tag{1}$$

式中: W ——地面沉降综合风险指数;

a_j —— j 类影响因素的权重;

b_j —— j 类影响因素的分值。

2.3 地面沉降易发程度分区

以区内第四纪松散层分布厚度、土层力学性质及空间分布、含水层发育层数及富水性、浅部主要压缩层发育等为主要因素,开展宁波市地面沉降易发程度评价;根据评价结果进行易发程度分区,分为高易发、中易发、低易发和不易发区等四个级别。根据《地质灾害危险性评估规范》(DB33/T 881—2012)^[23],用于地面沉降易发程度等级划分的综合分值计算公式为:

$$A = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot \tau_i \tag{2}$$

式中: A ——综合分值;

σ_i 、 τ_i ——分别为地面沉降 i 项影响因素相应的量化指标赋分及权重,参考《地质灾害危险性评估规范》(DB33/T 881—2012)^[23]取值。

地面沉降易发程度分区结果表明:宁波市地面沉降无高易发区,中、低易发区主要与区内全新世软土层厚大、历史上大量开采地下水、局部高强度城市建设以及沿海围垦工程等因素有关。

3 风险区划结果与管控建议

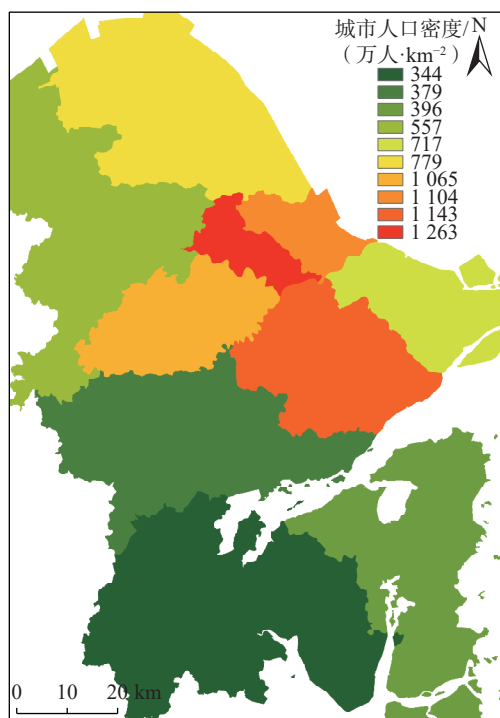
3.1 风险区划结果

风险区划采用的影响因素包括地面高程、易发程度、地面累积沉降量、沉降速率、城市人口密度和建设用地比重,各项数据的来源情况见表4。

表4 地面沉降风险区划影响因素数据来源
Table 4 Data sources of influencing factors for land subsidence risk zoning

数据名称	单位	数据来源
地面高程	m	2019年宁波市各区县高程数字模型(1:10 000 DEM)
易发程度		依据《地质灾害危险性评估规范》(DB33/T 881—2012)的计算结果
地面累计沉降量	mm	InSAR遥感监测数据与沉降点监测数据
沉降速率	mm·a ⁻¹	InSAR遥感监测数据与沉降点监测数据
城市人口密度	万人·km ⁻²	宁波市统计年鉴(2020)
建设用地比重	%	第三次全国国土调查成果(2020)

地面沉降风险等级计算和分析采用栅格计算方式进行。首先将表4中6类影响因素的源数据导入至GIS软件并进行整理;然后分别对各影响因素的数据结果进行栅格划分,即由矢量形式转为栅格形式(栅格像元大小40 m×40 m),以城市人口密度为例,可得如图4(a)所示结果;进一步根据表2中的分值标准对各影响因素的栅格数据进行重新赋值得到如图4(b)所示结果;接着利用GIS软件中的栅格计算工具将各影响因素的栅格分值数据乘以相应的权重并相加,获得结果后根据表3进行地面沉降风险区等级划分;最后对划分结果进行矢量化即可得到最终的地面沉降风险区划图。本文中地理底图采用国家最新版CGCS 2000大地坐标系,成图的比例尺为1:50 000,图中仅保留必要水系、交通、行政界线、地名等主要地理要素,以不同颜色代表不同风险区划结果。



(a) 城市分区人口密度



(b) 数据重新赋值

图 4 宁波市城市人口密度栅格数据图

Fig. 4 Grid data map of urban population density in Ningbo City

宁波市地面沉降风险区划结果如图 5 所示, 宁波市全域无高风险区; 中风险区面积 132.6 km^2 , 占比 3.2%; 低风险区面积 $2\,214.8 \text{ km}^2$, 占比 53.0%; 中风险区、低风险区、水系、基岩山区以外的区域, 为不易发区, 面积

$1\,827.9 \text{ km}^2$, 占比 43.8%。相应地, 本文 1.2 节也对宁波市 2020 年不同地面沉降速率区域的面积占比进行了统计, 沉降速率 $>20 \text{ mm/a}$ 面积占比 3.3%、 $5 \sim 20 \text{ mm/a}$ 面积占比 34.5%、 $0 \sim 5 \text{ mm/a}$ 面积占比 62.1%。地面沉降速率等监测结果作为地面沉降风险评价的关键指标之一, 与地面沉降风险区划结果存在着较强的相关性。需要注意的是, 地面沉降风险也受到软土层厚度、含水层数量、人口密度、建设用地比重等因素的影响, 因此风险区划分结果与地面沉降监测结果又存在一定的差别。

3.2 管控建议

地面沉降会对建(构)筑物和各类基础设施带来影响, 造成建筑物地基下沉、房屋开裂、道路沉降、地下管线受损, 形成的地面沉降漏斗会降低防洪排涝工程效能, 台风暴雨时会造成大面积积水、加剧洪涝灾害。大面积均匀/不均匀沉降也会影响城市建设和资源开发, 不利于城市基础设施的运营维护; 对于滨海城市, 造成的高程损失会带来海水倒灌等风险。因此, 针对宁波市不同的地面沉降风险区分别提出管控建议(表 5)。

4 结论

(1) 结合 2017—2020 年宁波市 InSAR 遥感监测数据与水准监测点数据, 利用 InSAR 技术在较大范围内监测地面沉降、利用水准监测点更为准确地在局部测量地面沉降, 从而在较大区域范围内相对可靠地获取地面沉降数据。结果表明全市形成的十余个沉降带, 大多位于围垦区域、城市开发建设热点区域。

(2) 选取地面高程、沉降易发程度、地面累计沉降量、沉降速率、城市人口密度、建设用地比重等 6 个评价因子建立地面沉降风险评价体系; 其中沉降易发程度为综合考虑地质条件、水文地质条件、人为活动影响后的综合性评价因子。从而根据宁波市沿海平原地面沉降形成机理, 结合长期地面沉降监测成果, 采取“经验总结+专家打分”相结合的方法综合确定各评价指标、权重、分级, 形成评价体系。

(3) 地面沉降风险区划结果表明, 宁波市全域无高风险区, 中风险区面积占比 3.2%, 低风险区面积占比 53.0%, 不易发区面积占比 43.8%; 设置高铁、轨道交通等重大工程保护区两侧 200 m 范围为地面沉降风险防控带。在此基础上, 提出了相应的管控建议如严格执行地下水开采管理、优化地面沉降监测网络、针对重大工程开展监测及管理。

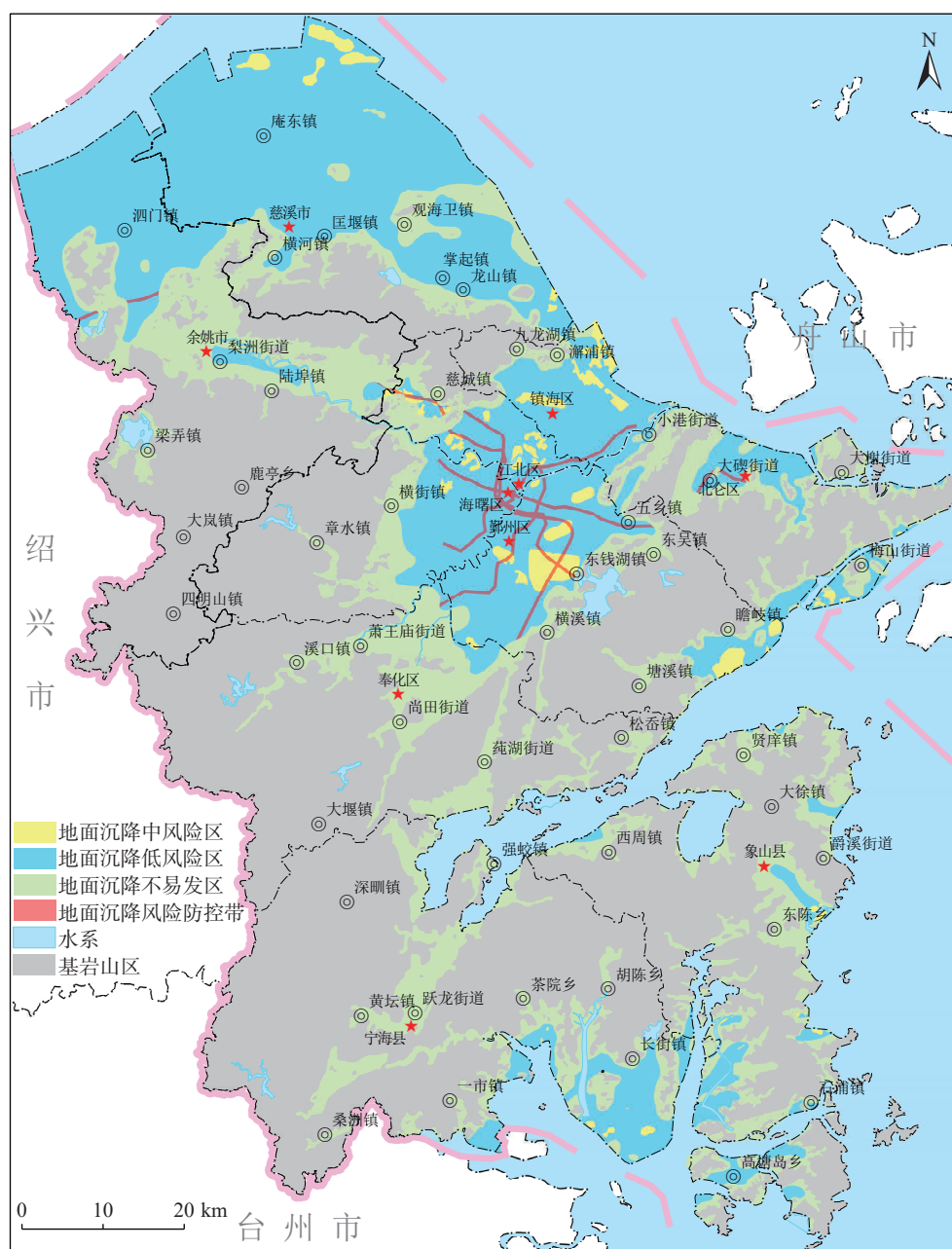


图5 宁波市地面沉降风险区划图

Fig. 5 Ground subsidence risk zoning map of Ningbo City

表5 宁波市地面沉降风险区管控建议一览表

Table 5 Summary of control recommendations for ground subsidence risk zones in Ningbo City

风险区等级	面积/km ²	管控建议
地面沉降 中风险区	132.6	①严格执行地下水禁、限采区管理要求; ②进一步完善“空天地一体化”监测网络,提高地下水位、地面沉降监测频率,提高围填海区域的监测点密度; ③加强重大工程建设项目地面沉降综合防治方案制定; ④加强地面沉降网络和数据库建设,形成与城市线状市政工程建设、运营单位的沉降监测数据共享,各方协同防治沉降的机制
地面沉降 低风险区	2 214.8	①继续严格贯彻地下水禁、限采区管理要求; ②进一步完善和优化地面沉降和地下水监测网络,加强日常监管; ③合理布局城市建设规划,加强深基坑等工程建设活动引发的地面沉降监测与管理
地面沉降 风险防控带		①加强高铁、轨道交通沿线两侧的地下水开发利用及邻近工程降排水管理; ②推进沿线地面沉降监测及系统预警机制建设,加强建设与重大工程密切相关的浅部含水层地下水监测井,完善地面沉降监测网络。

参考文献(References):

- [1] 王福刚, 梁秀娟, 于军. 可视化地层模型信息系统在地面沉降研究中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 219 - 223. [WANG Fugang, LIANG Xiujuan, YU Jun. The application of the information system of visualized strata model to the research of land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 219 - 223. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘传正, 陈春利. 中国地质灾害防治成效与问题对策 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 375 - 383. [LIU Chuanzheng, CHEN Chunli. Achievements and countermeasures in risk reduction of geological disasters in China [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 375 - 383. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 葛伟丽, 李元杰, 张春明, 等. 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 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 198 - 206. [GE Weili, LI Yuanjie, ZHANG Chunming, et al. An attribution analysis of land subsidence features in the city of Bayannur in Inner Mongolia based on InSAR [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 198 - 206. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 何健辉, 张进才, 陈勇, 等. 基于弱光栅技术的地面沉降自动化监测系统 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 146 - 153. [HE Jianhui, ZHANG Jincai, CHEN Yong, et al. Automatic land subsidence monitoring system based on weak-reflection fiber gratings [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 146 - 153. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张严, 朱武, 赵超英, 等. 佛山地铁塌陷 InSAR 时序监测及机理分析 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1167 - 1177. [ZHANG Yan, ZHU Wu, ZHAO Chaoying, et al. Monitoring and inversion of Foshan metro collapse with multi-temporal insar and field investigation [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 1167 - 1177. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 张阿根, 吴建中. 上海地面沉降管理对策与法制建设 [J]. 城市地质, 2006, 1(2): 55 - 59. [ZHANG Aigen, WU Jianzhong. Management countermeasures and legal system construction for land subsidence in Shanghai [J]. City Geology, 2006, 1(2): 55 - 59. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 赵团芝, 侯艳声, 胡新锋. 浙江宁波工程性地面沉降特征与风险区划 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 36 - 42. [ZHAO Tuanzhi, HOU Yansheng, HU Xinfeng. Characteristic analysis and risk zoning of engineering land subsidence in Ningbo City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(4): 36 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 赵团芝, 侯艳声, 胡新锋. 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, 2016, 37(3): 60 - 64. [ZHAO Tuanzhi, HOU Yansheng, HU Xinfeng. Engineering-related land subsidence in Ningbo City: An analysis of its causes and countermeasures [J]. Shanghai Land & Resources, 2016, 37(3): 60 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 赵庆香, 黄岁梁, 杜晓燕. 天津市地面沉降风险分析研究 [J]. 中国公共安全(学术版), 2007(3): 48 - 53. [ZHAO Qingxiang, HUANG Suiliang, DU Xiaoyan. Risk analysis on land subsidence in Tianjin [J]. China Public Security (Academy Edition), 2007(3): 48 - 53. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡蓓蓓, 姜衍祥, 周俊, 等. 天津市滨海地区地面沉降灾害风险评估与区划 [J]. 地理科学, 2008, 28(5): 693 - 697. [HU Beibei, JIANG Yanxiang, ZHOU Jun, et al. Assessment and zonation of land subsidence disaster risk of Tianjin Binhai area [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(5): 693 - 697. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 胡喜梅, 马传明, 邓波, 等. 江苏省沿海地区地面沉降风险评价 [J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 222 - 228. [HU Ximei, MA Chuanming, DENG Bo, et al. Risk evaluation of land subsidence in coastal areas of Jiangsu Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(2): 222 - 228. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张彭, 朱邦彦, 孙静雯, 等. 利用多源数据分析南京市河西地面沉降风险 [J]. 测绘通报, 2019(11): 141 - 144. [ZHANG Peng, ZHU Bangyan, SUN Jingwen, et al. Risk analysis of land subsidence in Hexi area in Nanjing based on multi-source data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(11): 141 - 144. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 房浩, 何庆成, 徐斌, 等. 沧州地区地面沉降灾害风险评估研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 159 - 164. [FANG Hao, HE Qingcheng, XU Bin, et al. A study of risk assessment of the land subsidence in Cangzhou [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 159 - 164. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈蓓蓓. 北京地区地面沉降监测及风险评估研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2009. [CHEN Beibei. Study on land subsidence monitoring and risk assessment in Beijing area [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王齐鑫, 王龙平, 王泽宇. 安徽阜阳中心城区地面沉降灾害风险评估 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(4): 32 - 39. [WANG Qixin, WANG Longping, WANG Zeyu. Risk assessment of land subsidence in central area of Fuyang City, Anhui Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4): 32 - 39. (in Chinese with English abstract)]

- Chinese with English abstract)]
- [16] 于海若, 宫辉力, 陈蓓蓓, 等. 京津冀地区地面沉降研究进展与思考 [J]. 测绘科学, 2020, 45(4): 125 – 133. [YU Hairuo, GONG Huili, CHEN Beibei, et al. The advance and consideration of land subsidence in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(4): 125 – 133. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 戴真印, 刘岳霖, 张丽平, 等. 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, 2023, 34(1): 58 – 67. [DAI Zhenyin, LIU Yuelin, ZHANG Liping, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of land subsidence in Dongguan based on improved time series InSAR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 58 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李佳琦, 徐佳, 刘杰, 等. 天津地面沉降严重区分布特征及变化规律 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 53 – 60. [LI Jiaqi, XU Jia, LIU Jie, et al. Distribution characteristics and evolution trend of severe land subsidence areas in Tianjin City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 53 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王寒梅. 上海市地面沉降风险评价体系及风险管理研究 [D]. 上海: 上海大学, 2013. [WANG Hanmei. Study on risk assessment system and risk management of land subsidence in Shanghai [D]. Shanghai: Shanghai University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 吴柯, 张晓平, 刘浩, 等. 粉质黏土地层超大直径泥水盾构隧道地表变形与施工参数相关关系研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1555 – 1566. [WU Ke, ZHANG Xiaoping, LIU Hao, et al. Correlation between surface deformation and construction parameters in silty clay ground tunneling with super large diameter slurry shield tbm [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1555 – 1566. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 苏秀婷, 陈健, 李明宇, 等. 大直径泥水盾构隧道穿越复杂环境地层变形敏感性研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1587 – 1598. [SU Xiuting, CHEN Jian, LI Mingyu, et al. Sensitivity analysis of deformation of large diameter mudwater shield through complex environment [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1587 – 1598. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王小军, 蒋勇, 王文笛, 等. 宁波滨海软土地铁盾构隧道地表沉降效应与数值模拟研究 [J]. 路基工程, 2018(4): 61 – 68. [WANG Xiaojun, JIANG Yong, WANG Wendi, et al. Research on ground surface settlement effect and numerical simulation of shield tunnel of subway in soft soil of coast in Ningbo [J]. Subgrade Engineering, 2018(4): 61 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 浙江省质量技术监督局. 地质灾害危险性评估规范: DB33/T 881—2012 [S]. 北京: 中国地质大学出版社, 2012. [Code for risk assessment of geological disaster: DB33/T 881-2012 [S]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2012. (in Chinese)]